



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA BEATRIZ PIMENTA SUZANO

**CONTRIBUIÇÃO A PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO SUJEITAS À CORROSÃO POR TRANSPORTE
DE CLORETOS. UMA ABORDAGEM AO FLUXO CONVECTIVO DE
ÍONS CLORETO.**

Vitória – ES
2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA BEATRIZ PIMENTA SUZANO

**CONTRIBUIÇÃO A PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO SUJEITAS À CORROSÃO POR TRANSPORTE
DE CLORETOS. UMA ABORDAGEM AO FLUXO CONVECTIVO DE
ÍONS CLORETO.**

Dissertação apresentada ao **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo**, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Manoel Ferreira Frasson

Vitória – ES
2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)
Sandra Mara Borges Campos – CRB-6 ES-000593/O

S968c Suzano, Ana Beatriz Pimenta, 1992-
Contribuição a previsão de vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão por transporte de cloretos : uma abordagem ao fluxo convectivo de íons cloreto / Ana Beatriz Pimenta Suzano. – 2017.
120 f. : il.

Orientador: João Luiz Calmon Nogueira da Gama.
Coorientador: Antônio Manoel Ferreira Frasson.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Durabilidade (Engenharia). 2. Método dos elementos finitos. 3. Concreto armado. 4. Corrosão. 5. Cloretos. 6. Convecção. I. Gama, João Luiz Calmon Nogueira da. II. Frasson, Antônio Manoel Ferreira. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

*“Aprender é a única coisa que a mente
nunca se cansa, nunca tem medo e
nunca se arrepende. ”*

*Leonardo da Vinci
(15.04.1452 – 02.05.1519)*

AGRADECIMENTOS

À UFES, eu serei eternamente grata. Minha história na Universidade começou aos 9 anos, no “Infantil 1” do curso de inglês do Centro de Línguas. Terminei em 2008 (foram 7 anos de inglês), ano do 3º ano, em que dediquei todos os meus estudos e forças para passar no vestibular, e realizar meu sonho de entrar na UFES como universitária. Em 2009 ingressei no curso de Engenharia Civil. Ao final do curso, segui no Mestrado em Engenharia Civil e cá estou, 2 anos e 9 meses depois.

Nesses 16 anos, muito mais da metade da minha vida, vivi muitas coisas maravilhosas e também muitos momentos difíceis, mas que foram fundamentais para me fazerem amadurecer e crescer. Ao fim desse mestrado, encerro esse grande período. Preciso sair e mudar um pouco, mas a UFES estará para sempre em meu coração.

Ao meu orientador Calmon, que me orienta desde o meu projeto de graduação e sempre esteve me motivando a fazer um bom trabalho, acreditando mais no meu potencial do que eu mesma. Foi preciso muita paciência e muito incentivo para eu conseguir chegar até aqui.

Ao meu coorientador Frasson, que me deu muito mais aulas do que ele gostaria. O que era para ser um semestre de aula de elementos finitos, tornou-se o período todo do mestrado, e nos últimos meses, encontros quase que diários.

Aos dois, obrigada por dividirem todos os seus conhecimentos comigo.

Aos meus pais, por uma vida de apoio e dedicação à minha educação.

Às minhas irmãs, por sempre aliviarem minha tensão com muitas risadas.

Ao Monclar, que apareceu na minha vida quando eu passei no vestibular, e nela ficou. Depois da graduação, seguimos caminhos diferentes na carreira, mas continuamos juntos e apoiando um ao outro sempre.

À FAPES pela bolsa de auxílio disponibilizada para esta pesquisa.

Aos meus amigos do Labesbim (Laboratório de Engenharia Simultânea e Building Information Modeling), que tornaram meus dias de estudos mais prazerosos.

E a todos, que direta ou indiretamente me ajudaram na elaboração desse trabalho, muito obrigada.

RESUMO

O concreto, como material de construção, é instável ao longo do tempo e suas alterações comprometem o desempenho de uma estrutura. A corrosão da armadura é um dos grandes problemas que as estruturas de concreto armado enfrentam por causa da redução substancial da área de aço, da perda de aderência, da formação de fissuras e lascamento do concreto e a causa principal é o ataque de cloretos. Ao longo das últimas décadas, diversas pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de prever a vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas ao ataque de cloretos. Com essas pesquisas, surgiram uma variedade de modelos para auxiliar os engenheiros. Esse trabalho apresenta uma contribuição à previsão de vida útil de estruturas de concreto armado. Alguns modelos de previsão com solução analítica ou numérica são analisados e é desenvolvido um modelo numérico utilizando a técnica de elementos finitos com base nos aspectos que foram analisados dos outros modelos. O modelo numérico desenvolvido neste estado leva em consideração as flutuações ambientais da umidade e da temperatura, a ligação de cloretos, a difusão e a convecção. Os ciclos de secagem e molhagem também são abordados. São resolvidas três equações acopladas: transferência de calor, fluxo de umidade e transporte de cloretos. O modelo é aplicado a uma viga em região marinha na cidade de Vitória, ES e os resultados são comparados com a solução analítica e com o modelo proposto por Dominicini (2016). Além disso, outras simulações envolvendo convecção, ligação de cloretos e ciclos de molhagem e secagem são realizadas.

ABSTRACT

Concrete, as a building material, is unstable over time and its alterations compromise the performance of a structure. Reinforcement corrosion is one of the major problems facing reinforced concrete structures because of the substantial reduction of the steel area, loss of adhesion, cracking and spalling of concrete, and the main cause is the attack of chlorides. Over the last decades, several researches have been carried out to predict the service life of reinforced concrete structures subjected to the attack of chlorides. With these surveys, a variety of models have emerged to assist engineers. This work presents a contribution to the prediction of service life of reinforced concrete structures. Some predictive models with analytical or numerical solution are analyzed and a numerical model are developed using the finite element method based on the aspects that were analyzed from other models. The numerical model developed in this study takes into account the environmental fluctuations of humidity and temperature, chlorides binding, diffusion and convection. Drying and wetting cycles are also covered. Three coupled equations are solved: heat transfer, moisture flow and chloride transport. The model is applied to a beam in a marine region in the city of Vitória, ES and the results are compared with the analytic solution and the model proposed by Dominicini (2016). In addition, other simulations involving convection, chloride bonding and wetting and drying cycles are performed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Célula de corrosão no concreto armado.....	29
Figura 2.2: Modelo de vida útil para as estruturas de concreto armado sujeitas a corrosão.	22
Figura 2.3: Vida útil das estruturas	23
Figura 2.4: Modelos de análise da durabilidade das estruturas	38
Figura 2.5: Zonas de Convecção e Difusão.....	33
Figura 3.1: Modelos de previsão de cloretos em ordem cronológica.....	41
Figura 3.2: Relação entre o coeficiente a relação água/cimento do concreto	44
Figura 3.3: Isotermas de ligação do cloreto.....	52
Figura 3.4: Isoterma de sorção – Influência do tempo de exposição.....	56
Figura 3.5: Isoterma de sorção – Influência da relação a/c.....	56
Figura 3.6: Efeito Pele	61
Figura 4.1: Áreas para definição de Nl	67
Figura 4.2: Transformação de coordenadas para integração em triângulo mestre no plano $\xi - \eta$	68
Figura 4.3: Pontos no plano $\xi - \eta$ para integração por quadratura numérica de 7 pontos	70
Figura 4.4: Representação da transformação linear	70
Figura 4.5: Etapas e interfaces para o desenvolvimento do programa.	81
Figura 4.6: Aproximação no limite da estrutura	82
Figura 4.7: Fluxograma do modelo	84
Figura 5.1: Geometria e malha da viga analisada	87
Figura 5.2: Comparação entre a solução analítica e a solução numérica para difusão simples	90
Figura 5.3: Comparação entre a temperatura ambiente e a temperatura em um nó a 2 cm da superfície.	91
Figura 5.4: Comparação entre a umidade ambiente e a umidade em um nó a 2 cm da superfície.	92
Figura 5.5: $f1(T)$ considerando a temperatura ambiente e a temperatura a um nó a 2 cm da superfície.....	93
Figura 5.6: $f3(h)$ considerando a umidade ambiente e a umidade a um nó a 2 cm da superfície.....	93
Figura 5.7: Comparação entre a solução analítica, Dominicini (2016) e o modelo desse trabalho para 10 anos	95

Figura 5.8: Comparação entre a solução analítica, Dominicini (2016) e o modelo desse trabalho para 30 anos	96
Figura 5.9: Comparação entre a solução analítica, Dominicini (2016) e o modelo desse trabalho para 50 anos	96
Figura 5.10: Comparação entre resultados considerando somente a difusão e considerando difusão e convecção combinadas.....	97
Figura 5.11: Resultados encontrados por Lin et al. (2010) considerando apenas difusão e considerando difusão e convecção	98
Figura 5.12: Comparação entre os resultados obtidos para a concentração de cloretos considerando cloretos ligados ou não.....	99
Figura 5.13: Resultados obtidos considerando cloretos livres para 10 anos.....	100
Figura 5.14: Resultados obtidos considerando cloretos livres para 30 anos.....	100
Figura 5.15: Resultados obtidos considerando cloretos livres para 50 anos.....	101
Figura 5.16: Fluxo de umidade através da viga para 10, 30 e 50 anos	102
Figura 5.17: Transporte de cloretos através da viga para 10, 30 e 50 anos.....	102
Figura 5.18: Ciclos de secagem e molhagem	103
Figura 5.19: Concentração de cloretos livres durante o ciclo de molhagem e de secagem para 10, 30 e 50 anos.	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Características das diferentes zonas de exposição.....	36
Quadro 2.2: Classes de agressividade ambiental	36
Quadro 3.1: Equações das isotermas de ligação	53
Quadro 3.2: Principais equações dos modelos determinísticos com solução analítica.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Limites de norma de teor de cloretos para proteção das armaduras do concreto	28
Tabela 4.1: Tabela de pesos nos 7 pontos da quadratura numérica em um triângulo	70
Tabela 5.1: Dados da geometria e malha da viga.....	86
Tabela 5.2: Parâmetros utilizadas na aplicação do modelo	88
Tabela 5.3: Comparação entre os fatores de dependência utilizando aproximação com o ambiente e com temperatura e umidade acopladas	94
Tabela 5.4: Parâmetros para cálculo do coeficiente de difusão de umidade durante os ciclos de secagem e molhagem	104
Tabela 5.5: Valores de cobrimento para o fim de vida útil de 50 anos para diversas situações	105
Tabela 5.6: Valores de concentração de cloretos para um cobrimento de 5 cm e de 7 cm e fim da vida útil de 50 anos para diversas situações	106

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE QUADROS	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	18
1.1.1. Objetivo Geral.....	18
1.1.2. Objetivos Específicos	18
1.1.3. Limitações da pesquisa.....	18
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1. PRINCÍPIOS DA MODELAGEM DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.....	21
2.1.1. Carbonatação	24
2.1.2. Penetração de Íons Cloreto	25
2.1.2.1 <i>Tipos de cloreto no concreto</i>	25
2.1.2.2 <i>Fatores que influenciam o ingresso de cloretos no concreto</i>	27
2.1.2.3 <i>Teor crítico de cloretos</i>	27
2.1.3. CORROSÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO	28
2.2. TRANSPORTE DE CLORETOS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	
30	
2.2.1. Difusão	30
2.2.2. Convecção	32
2.2.3. Permeabilidade.....	33

2.2.4. Migração de íons	34
2.3. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS E CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS	35
2.3.1. Temperatura.....	35
2.3.2. Umidade Relativa	35
2.3.3. Condições de Exposição	35
2.4. Limitações e Níveis da Modelagem	36
 3. MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS ATACADAS PELA CORROSÃO DE ARMADURAS – ETAPA DE INICIAÇÃO 41	
3.1. MODELOS DETERMINÍSTICOS COM SOLUÇÃO ANALÍTICA.....	42
3.1.1. Modelo de Uji et al. (1990).....	42
3.1.2. Modelo de Mangat e Molloy (1994)	43
3.1.3. Modelo de Yamamoto et al. (1995).....	44
3.1.4. Modelo de Mejlbro (1996)	45
3.1.5. Conclusões sobre os modelos com soluções analíticas	46
3.2. MODELOS DETERMINÍSTICOS COM SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	46
3.2.1. Modelo de Saetta et al. (1993)	47
3.2.1.1. <i>Coeficiente de difusão de cloretos</i>	47
3.2.1.2. <i>Transporte de cloretos por difusão e convecção</i>	48
3.2.1.3. <i>Acoplamento com difusão de calor e de umidade</i>	49
3.2.1.4. <i>Condições de contorno</i>	50
3.2.2. Modelo de Martín Pérez (1999)	51
3.2.2.1. <i>Coeficiente de difusão de cloretos</i>	51
3.2.2.2. <i>Transporte de cloretos por difusão</i>	51
3.2.2.3. <i>Difusão e convecção de cloretos</i>	53
3.2.2.4. <i>Acoplamento com difusão de calor e de umidade</i>	54
3.2.2.4 <i>Condições de contorno</i>	56
3.2.2.5 <i>Considerações sobre o Modelo de Martín-Pérez (1999)</i>	57
3.2.3. Modelo de Lin et al. (2010).....	57

3.2.3.1. Coeficiente de difusão de cloretos	57
3.2.3.2. Difusão e convecção de cloretos.....	57
3.2.3.3. Acoplamento com difusão de calor e de umidade.....	58
3.2.3.3. Condições de contorno.....	59
3.2.3.4. Considerações sobre o modelo de Lin et al. (2010)	59
3.2.4. Modelo de Dominicini (2016)	60
3.2.4.1. Efeito Pele	60
3.2.4.2 Radiação Solar.....	61
3.3. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DETERMINÍSTICOS COM SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	62
4. MODELO E MÉTODOS.....	65
4.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	65
4.1.1. Método dos Resíduos Ponderados	65
4.1.2. Elementos finitos triangulares em 2D	67
4.1.2.1. Integração numérica.....	68
4.1.2.2. Matriz elementar para 2D linear.....	70
4.1.2.3. Matriz elementar para 2D quadrática.....	71
4.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS...	71
4.2.1. Passo no tempo pelo Método das Diferenças Finitas.....	74
4.3. FLUXO DE UMIDADE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	74
4.3.1. Passo no tempo pelo Método das Diferenças Finitas.....	76
4.4. TRANSPORTE DE CLORETOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS..	76
4.4.1. Passo no tempo pelo Método das Diferenças Finitas.....	80
4.5. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA.....	80
4.5.1. Dificuldades na implementação do modelo.....	81
4.5.2. Fluxograma do programa	83
5. APLICAÇÃO DO MODELO: SIMULAÇÕES E ANÁLISES.....	86
5.1. APLICAÇÃO DO MODELO	86
5.2. VERIFICAÇÃO DO MODELO COM A SOLUÇÃO ANALÍTICA.....	89

5.3. VERIFICAÇÃO DO MODELO COM O COEFICIENTE DE DIFUSÃO VARIANTE NO TEMPO E NO ESPAÇO.....	90
5.4. VERIFICAÇÃO DO MODELO COM CONVECÇÃO	97
5.5. VERIFICAÇÃO DO MODELO CONSIDERANDO LIGAÇÃO DE CLORETOS.....	99
5.6. VERIFICAÇÃO DO MODELO COM CICLOS DE SECAGEM E MOLHAGEM ...	103
5.7. FIM DA VIDA ÚTIL E DETERMINAÇÃO DA CAMADA DE COBRIMENTO	105
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	
109	
6.1. CONCLUSÕES	109
6.2. ASPECTOS SINGULARES DO MODELO DESENVOLVIDO.....	110
6.3. CONCLUSÕES RELATIVAS ÀS SIMULAÇÕES	111
6.4. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
7. REFERÊNCIAS	115

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Desenvolvimento sustentável é um tema que está sendo muito abordado nos últimos tempos. De fato, a sociedade vem sendo obrigada a mudar o seu comportamento, inclusive na construção civil. Com isso, ganha destaque o estudo da durabilidade das construções, pois estruturas duráveis impactam na sustentabilidade de duas formas: através da conservação de energia, matérias-primas e recursos naturais; e pela redução na quantidade de resíduos gerados. Além do notável fator econômico, uma vez que tem grande influência no custo do ciclo de vida de uma estrutura (DOMINICINI, 2016).

O concreto, como material de construção, é instável ao longo do tempo. Suas propriedades físicas e químicas são alteradas em função das características de seus componentes e das respostas destes às condicionantes do meio ambiente. Às consequências desses processos de alteração que comprometem o desempenho de uma estrutura, costuma-se chamar deterioração (SOUZA e RIPPER, 2009).

O concreto armado deve reunir condições de resistência do ponto de vista mecânico e de constituição que o leve a suportar as ações externas de caráter físico e químico. As ações de tipo químico são as de maior importância e as que produzem maiores danos (CÁNOVAS, 1988).

A corrosão da armadura é uma ação de caráter químico que afeta a construção civil em todo o mundo, com repercussões em função do volume de casos registrados, da precocidade com que ocorrem, bem como do montante de recursos envolvidos. Ela causa enormes prejuízos, gera altos custos de manutenção, sendo sua correção difícil e dispendiosa e pode causar até mesmo acidentes fatais. As estruturas são afetadas por meio da redução substancial da área de aço, da perda de aderência, da formação de fissuras e lascamento do concreto (MEIRA, 2017).

Quando a armadura está protegida do ar por uma adequada camada de cobrimento, como concreto de baixa permeabilidade, a expectativa é de que a corrosão do aço e outros problemas associados a ela não ocorram. Isso não é completamente verdadeiro na prática porque fica evidente pela alta frequência com que as estruturas de concreto começam a apresentar deterioração prematura devido à corrosão, mesmo quando adequadamente executadas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Muitas vezes, devido à complexidade do processo, não é fácil, nem rápido justificar o porquê de uma

estrutura corroída quando tantas outras semelhantes, não apresentaram problema (HELENE, 1993).

O ataque por íons cloreto é o principal causador da corrosão da armadura e, portanto, afeta a vida útil de estruturas de concreto armado. Entende-se por vida útil o período de tempo durante o qual o produto pode ser utilizado sob condições satisfatórias de segurança, saúde e higiene (MITIDIERI FILHO, 2007).

O estudo intensivo sobre a corrosão iniciou-se na década de 70, quando o efeito dos cloretos foi notado mais evidente. Avanços teóricos sobre o assunto não só permitiram a melhoria dos padrões e códigos existentes na prática, mas eles também têm levado à introdução de uma variedade de modelos de previsão de vida útil que foram desenvolvidos para auxiliar os engenheiros na concepção de estruturas de concreto armado duráveis. Entretanto, apesar de todos estudos realizados, muitas questões permanecem não resolvidas (ANDRADE, 2009).

Há um esforço mundial para modelar matematicamente o fenômeno de corrosão de armaduras e seus fatores intervenientes, possibilitando a estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado. Pode-se, desta forma, projetar com base na durabilidade, associando o tempo às características da estrutura e do meio no qual ela está inserida, e não somente na resistência mecânica e segurança estrutural.

Uma quantidade considerável de modelos de previsão de vida útil já foi desenvolvida, entretanto, a existência de um grande número de fatores intervenientes, a falta de um entendimento preciso sobre os modelos físicos que abrangem esses fatores e a dificuldade na obtenção de parâmetros de entrada exatos, de estruturas reais e ao longo de grandes períodos, são enormes obstáculos encontrados em sua modelagem (ANDRADE, 2009). Assim, ainda não há uma abordagem amplamente aceita, sendo que esses modelos ainda não conseguiram alcançar efetivamente o mercado.

Este trabalho apresenta um modelo de penetração de cloretos no concreto através da difusão e convecção em estruturas de concreto armado utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) no domínio bidimensional. Este modelo prevê o tempo necessário, em determinada situação, para que um valor limite de cloretos para a despassivação da armadura seja atingido.

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo numérico computacional para predição da penetração de cloretos em estruturas de concreto armado, considerando difusão e o fluxo convectivo de íons cloreto.

1.1.2. Objetivos Específicos

Para o atendimento do objetivo geral descrito no item anterior, os seguintes objetivos específicos deverão ser necessariamente atendidos:

- Identificar os principais mecanismos de entrada de cloretos através do concreto;
- Selecionar as equações que descrevem os principais mecanismos identificados a partir de modelos relativos a etapa de iniciação existentes;
- Implementar o MEF e o método das diferenças finitas nas equações de transferência de calor, fluxo de umidade e transporte de cloretos no concreto (difusão e convecção);
- Selecionar uma estrutura e um local de exposição para avaliar o modelo desenvolvido;
- Empregar o modelo em situações distintas e avaliar os resultados.

1.1.3.Limitações da pesquisa

Esse trabalho abrange apenas o período de iniciação da corrosão de armaduras e não considera modelos relacionados ao período de propagação de fissuras.

Esse trabalho avalia somente o transporte de íons cloreto, não fazendo referência ao efeito combinado com outros agentes agressivos, como o anidrido carbônico (carbonatação).

Vale ressaltar que não é objetivo da pesquisa o desenvolvimento de um modelo exato de predição de vida útil, visto que a modelagem computacional não serve para simular com exatidão a realidade e sim tentar obter resultados que se aproximem ao máximo possível do fenômeno. Assim, sua finalidade maior consiste na contribuição ao entendimento do tema e no desenvolvimento de um modelo computacional no Brasil que empregue a difusão e convecção de íons cloreto.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em 6 capítulos.

O **Capítulo 1** introduz o tema do trabalho. Nele são apresentados o tema de forma contextualizada, sua relevância, justificativa, os objetivos e as limitações da pesquisa.

O **Capítulo 2** traz a fundamentação teórica. Nele são abordados os princípios da corrosão das armaduras no concreto e os princípios da modelagem de vida útil. Os principais mecanismos de penetração de cloreto nas estruturas de concreto armado são descritos e são abordadas a influência das características ambientais e condições de exposição na penetração de cloretos.

O **Capítulo 3** apresenta alguns modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras relativos à etapa de iniciação, e as principais equações que os regem. Os modelos são determinísticos e são classificados pela sua forma de solução, podendo ser analítica ou numérica.

O **Capítulo 4** descreve propriamente o modelo desenvolvido no trabalho e os métodos por trás dele, abordando o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas e suas aplicações nos problemas de transferência de calor, fluxo de umidade e transporte de cloretos.

O **Capítulo 5** traz os resultados e discussões da aplicação do modelo desenvolvido para uma viga localizada na cidade de Vitória, ES.

Por fim, o **Capítulo 6** apresenta as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2:

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PRINCÍPIOS DA MODELAGEM DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Entende-se por vida útil o período de tempo em que a estrutura conserva seus requisitos de projeto como segurança, funcionalidade e estética, sem custos inesperados de manutenção. Estimar esse período de tempo é de fundamental importância para que se possa abordar, de forma quantitativa, a questão da durabilidade das estruturas.

Existem duas metodologias para fazer previsão da vida útil (ACI COMMITTEE 365, 1997; apud MARTÍN-PÉREZ, 1999):

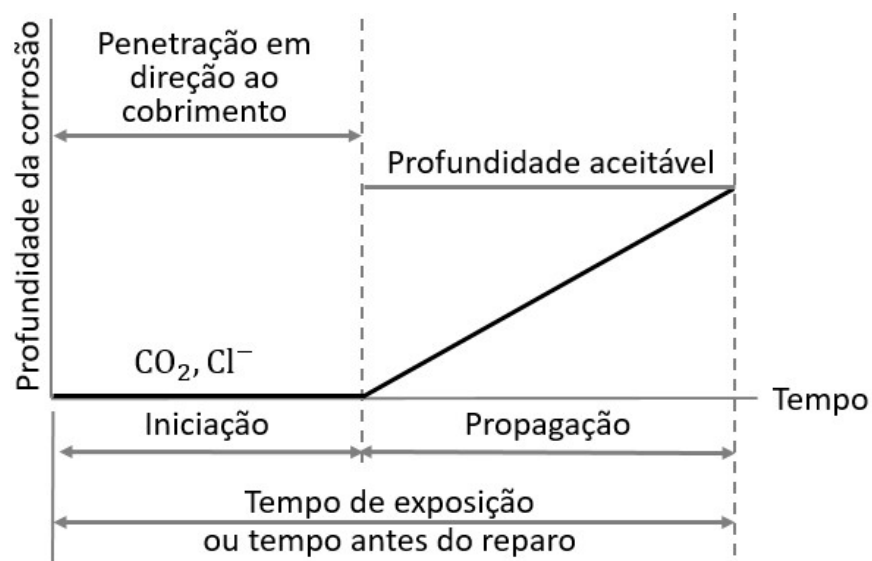
- Previsão de vida útil de novas estruturas;
- Estimativa de vida residual de estruturas em serviço.

Aqui será abordado apenas a primeira metodologia, a que diz respeito às novas estruturas, pois, estimar a vida residual requer a análise de outros fatores, tais como o estado atual de deterioração, que não são o foco desse trabalho.

A camada de concreto que envolve a armadura de aço é altamente alcalina, com seu pH variando entre 13 e 14. Essa camada protege o aço da corrosão. Para a corrosão ocorrer, o ambiente deve ter sido alterado para um ponto tal que o estado passivo tenha sido neutralizado. Isso pode ocorrer de forma localizada ou em uma grande parte dessa área de reforço (TUUTTI, 1982). A passividade pode ser destruída pela penetração de agentes agressivos (CO_2 , Cl^- , entre outros).

A experiência prática tem demonstrado que os cloretos penetram no concreto neutralizando a passividade localmente e que a camada de cobrimento do concreto é alterada quimicamente quando o dióxido de carbono penetra no material. Esse último fenômeno é conhecido como carbonatação. A carbonatação é o mecanismo de neutralização dominante no concreto (TUUTTI, 1982).

Tuutti (1982) divide o processo corrosivo em dois períodos: período de iniciação e período de propagação. Essa divisão, estabelecida há mais de 30 anos atrás, continua sendo aplicada nos modelos de vida útil atuais (Figura 2.1).

Figura 2.1: Modelo de vida útil para as estruturas de concreto armado sujeitas a corrosão.

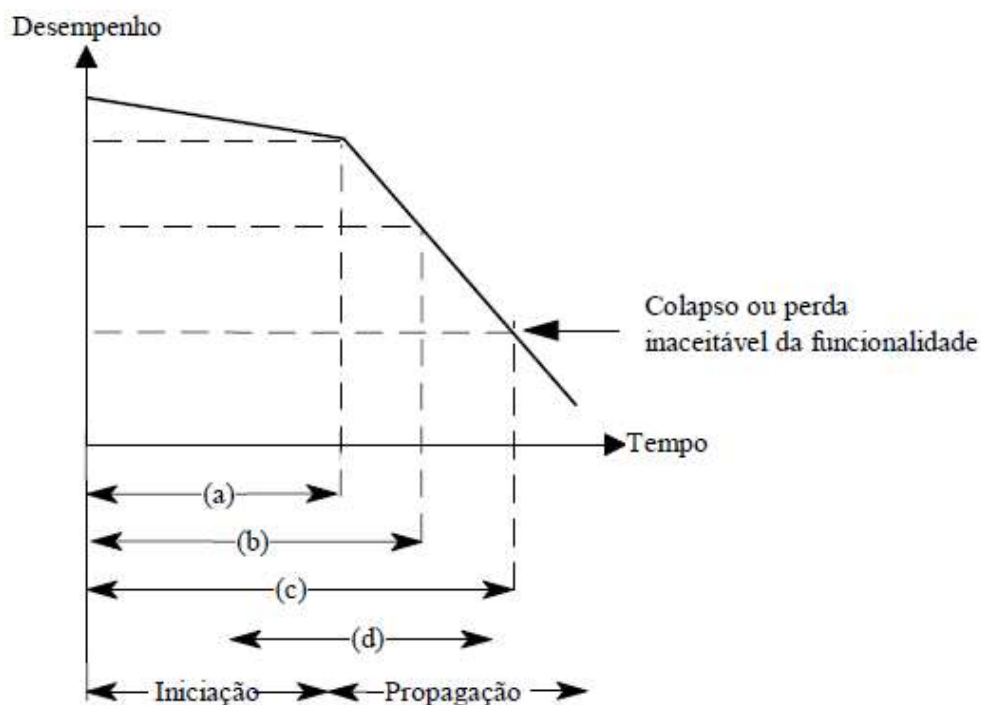
Fonte: Adaptado de Tuutti, 1982, p. 18.

Do ponto de vista da corrosão de armaduras, segundo o modelo proposto por Tuutti (1982), a duração do período de iniciação é determinada por o quão rápido a camada de cobrimento se modifica, como resultado da neutralização ou atuação dos agentes agressivos que penetram nos poros e pela concentração das substâncias que são requeridas para iniciar as reações químicas da corrosão.

Quando uma certa quantidade destes elementos chegam até o nível das barras provocam a despassivação das mesmas. Os principais mecanismos de despassivação das armaduras são a carbonatação e a penetração de cloretos. Após a despassivação o processo corrosivo começa efetivamente a instalar-se, com o início da fase de propagação, onde ocorre a oxidação do ferro.

Helene (1993) considera quatro “vidas úteis” que podem ser relacionadas com os períodos de iniciação e propagação (Figura 2.2):

Figura 2.2: Vida útil das estruturas



Fonte: De Oliveira Andrade, 2001, p. 18.

- Vida útil de projeto (a);
- Vida útil de serviço ou de utilização (b);
- Vida útil total (c);
- Vida útil residual (d).

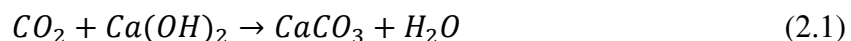
Através da Figura 2.2 pode-se observar que o período de iniciação corresponde a vida útil de projeto. Nesta etapa, os agentes agressivos ainda estão penetrando nas camadas superficiais do concreto e não atingiram níveis de concentração que possam causar danos à estrutura. A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) adota a vida útil de 50 anos para estruturas convencionais (edifícios e outras estruturas comuns). Esse valor pode aumentar para edifícios monumentais, pontes e outras estruturas, podendo ser adotado um valor de vida útil maior que 200 anos (FIB 53, 2010).

Esse trabalho diz respeito aos modelos de previsão relacionados a etapa de iniciação, ou vida útil de projeto.

2.1.1. Carbonatação

Nas superfícies do concreto que estão expostas, a alcalinidade da camada de cobrimento pode diminuir pela penetração do dióxido de carbono (CO_2) por difusão, através da rede de poros do material, que reage com o hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$] presente na pasta de cimento hidratada, dando origem ao fenômeno da carbonatação (DE OLIVEIRA ANDRADE, 2001).

A reação principal desse processo pode ser representada da seguinte forma:



Como pode ser observado pela equação acima, o dióxido de carbono reage com o hidróxido de cálcio em meio aquoso. Essa reação reduz o pH do líquido intersticial, fazendo com que ele passe de um valor maior que 12,5 para níveis próximos a 9 (DE OLIVEIRA ANDRADE, 2001) reduzindo assim as condições químicas de passividade dessa camada.

Segundo Hills et al. (2015) os modelos mais simplistas afirmam existir uma frente de avanço do processo, que separa duas zonas com pH muito diferentes. Mas a realidade é bastante complexa. Um exemplo é que o produto da reação ($CaCO_3$) é maior que os reagentes, o que obstrui os poros. Além disso, outros produtos resultantes da hidratação do cimento Portland também reagem com o dióxido de carbono, não somente o hidróxido de cálcio, e cada um deles apresenta uma velocidade de reação diferente.

Resumidamente, os fatores que contribuem para a carbonatação são:

- Condições ambientais: concentrações maiores de dióxido de carbono;
- Umidade do ambiente: poros com mais água;
- Traço do concreto: altas relações a/c;
- Lançamento e adensamento: pode aumentar a permeabilidade;
- Cura: processo fundamental para reduzir a carbonatação.

A análise da carbonatação não é foco desta pesquisa, mas vale entender que ela contribui para o processo de corrosão pela despassivação das armaduras.

2.1.2. Penetração de Íons Cloreto

Os estudos relacionados à durabilidade das estruturas de concreto armado verificam que a corrosão das armaduras provocada pela ação dos íons cloreto é um dos problemas mais sérios que podem ocorrer em uma estrutura.

Os íons cloreto podem penetrar no interior do concreto oriundos de diversas fontes, onde pode-se destacar (DE OLIVEIRA ANDRADE, 2001; PEREIRA, 2001; HELENE, 1993):

- Emprego de aceleradores de pega que contém cloreto de cálcio ($CaCl_2$). Quando este aditivo entrar em contato com a água, a sua dissolução provocará a liberação de íons cloreto que permanecerão na mistura.
- Contaminação dos materiais constituintes do concreto (água e agregados), principalmente em regiões litorâneas, em águas salobras ou excessivamente cloradas. Pode se encontrar cloretos até mesmo em cimentos, uma vez que os cloretos contribuem para o aumento das resistências iniciais.
- Contaminação proveniente do contato do concreto com o meio externo, tais como atmosferas marinhas, industriais, líquidos contaminados com cloretos, solos salinos, ou ainda oriundos do uso de sais de degelo.

Cabe ressaltar ainda que, quando os íons cloretos são adicionados no concreto durante a sua confecção, a reação destes íons com os componentes anidros do cimento se torna mais fácil. Porém, se o cloreto penetrar no concreto após o início de suas reações, restará pouco aluminato tricálcico anidro para reagir com estes íons, podendo ocorrer a despassivação com teores mais baixos de cloreto do que no primeiro caso (PEREIRA, 2001).

2.1.2.1 Tipos de cloreto no concreto

Os cloretos presentes no concreto podem ser encontrados no interior do concreto através de uma das seguintes formas:

- Quimicamente combinados: os cloretos podem combinar com elementos contidos no cimento. Na forma combinada, o íon cloreto não está disponível para promover a despassivação das armaduras no concreto.
- Fisicamente adsorvidos na superfície dos poros do concreto;

- Livres na solução dos poros do concreto: essa é a pior forma pois o cloreto pode penetrar através do cobrimento do concreto sem interagir com os componentes oriundos da hidratação do cimento. Ao atingir a armadura ele pode ocasionar sua despassivação. Os íons que efetivamente contribuem para a corrosão, bem como para o transporte de cloretos no concreto, são os íons livres.

Os cloretos podem penetrar no concreto por diferentes mecanismos, que serão detalhados em 2.3.

Os cloretos encontrados na forma de cristal sólido (ou fixos) não representam riscos elevados para as estruturas, pois não podem penetrar na porosidade do concreto, por terem dimensões muito maiores que a dos poros. Os mesmos podem depositar-se por impactação na superfície do concreto e aí permanecerem até que a água os dissolvam, tornando-o livre, podendo então ocorrer o transporte para o interior da estrutura (HELENE, 1993).

De acordo com Pereira (2001), os maiores responsáveis pela fixação dos cloretos são as fases aluminato do material cimentante, em particular o aluminato de cálcio hidratado. Para Helene (1993), a geração do Sal de Friedel, composto formado da combinação química de íons cloreto com o aluminato tricálcico (C_3A), e adsorção dos mesmos ao $C-S-H$ retardam a difusão destes no concreto, além de reduzir a quantidade de cloretos livres, contribuindo para a manutenção da passivação do aço. Por outro lado, deve-se entretanto chamar a atenção para o fato de que teores elevados de C_3A tornam o concreto mais vulnerável ao ataque por sulfatos.

Não se pode afirmar que o único parâmetro a influenciar na capacidade de retenção de cloretos seja o conteúdo de C_3A , pois outros produtos de hidratação parecem ser capazes de fixar um determinado valor de cloretos, como os silicatos de cálcio (NEVILLE, 1997; TUUTTI, 1982).

Cabe ressaltar, quanto ao possível uso de cimento com elevado teor de C_3A , a grande quantidade inicial de calor de hidratação desprendido e consequente elevação da temperatura, deste tipo de mistura, o que pode ser prejudicial em obras com grandes massa de concreto, como é o caso de muitas estruturas expostas ao mar (NEVILLE, 1997).

Outro ponto importante que deve ser levado em consideração é o tipo de cátion que acompanha o íon cloreto. Como exemplo, quantidade de cloretos livres é maior quando proveniente da dissociação do $NaCl$ do que do $CaCl_2$ (PEREIRA, 2001).

Resultados experimentais tem comprovado a redução na penetração de cloretos, em concretos contendo cinza volante, cinza de casca de arroz, sílica ativa e escória granulada de alto forno (HAQUE e KAYYALI, 1995; FERREIRA, 1999; HOFFMANN, 2001; OLLIVIER, 1998; apud PEREIRA, 2001).

A relação entre o teor limite de cloretos livres e o teor de cloretos fixados, conhecida como capacidade de fixação de cloretos, é influenciada por uma série de fatores, entre eles a concentração de cloretos livres na solução dos poros; o tipo, teor e composição química do aglomerante; o tipo e concentração de outras espécies iônicas na solução dos poros; a temperatura ambiente e a existência de camadas superficiais carbonatadas, dentre outros (PEREIRA, 2001).

2.1.2.2 Fatores que influenciam o ingresso de cloretos no concreto

Existem vários fatores que determinam a capacidade do concreto em resistir à penetração de cloretos, entre eles:

- Relação água-cimento: exerce grande influência por determinar características como porosidade, capacidade de absorção e permeabilidade da pasta de cimento hidratada. Quanto maior a relação água/cimento, a princípio, maior será a penetração de cloretos.
- Temperatura de cura: é um parâmetro muito importante, pois afeta os mecanismos de transporte e a velocidade das reações químicas. As reações de corrosão são mais rápidas a temperaturas mais elevadas e há um estímulo à mobilidade das moléculas, portanto o efeito acelerador da temperatura explica porque existem muitos mais concretos deteriorados em regiões litorâneas quentes do que em regiões temperadas (NEVILLE, 1997).
- Tempo de cura: o coeficiente de difusão depende do grau de hidratação do cimento e este coeficiente reduz à medida que o tempo transcorre.
- Composição química do cimento e adições: tem sua influência relacionada à capacidade de fixação dos íons cloreto.

2.1.2.3 Teor crítico de cloretos

Não se observa a existência de um consenso dentro da comunidade científica mundial sobre o teor de cloretos que pode provocar a despassivação da armadura. Segundo De Oliveira Andrade (2001), isso ocorre devido à grande quantidade de fatores que influenciam nos fenômenos de transporte e

absorção de cloretos no concreto. A Tabela 2.1 apresenta alguns limites propostos por algumas normas.

Tabela 2.1: Limites de norma de teor de cloretos para proteção das armaduras do concreto

Teor máximo de íons cloreto (Cl⁻) no concreto [% sobre a massa de cimento]			
	Brasil	Portugal	Estados Unidos
	NBR 12655:2015	NP EN 206-1:2007	ACI 222R-01:2001
Concreto protendido	0,05	0,10 ou 0,20	0,06 ou 0,08
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15		0,08 ou 0,10
Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40	0,20 ou 0,40	0,15 ou 0,20
Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30		-

Fonte: Elaborada pela autora.

2.1.3. CORROSÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO

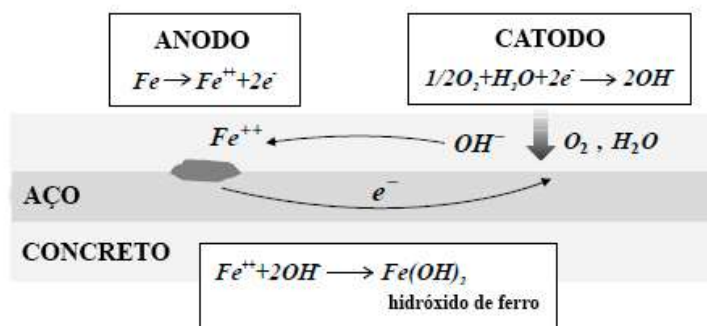
A corrosão pode ser vista como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos. O processo de corrosão, segundo a sua natureza, pode assumir duas formas: corrosão química ou corrosão eletroquímica.

A corrosão eletroquímica é a mais importante para as obras civis, uma vez que é a que ocorre nas estruturas de concreto armado e pode atingir graus de deterioração bastante significativos. Ela começa a se desenvolver no período de propagação.

A corrosão eletroquímica pressupõe a formação de uma pilha eletroquímica, existindo: um anodo (passagem do material do estado metálico para o estado iônico - oxidação), um catodo (são consumidos os elétrons gerados na região anódica – redução), uma diferença de potencial entre ambos, uma ligação metálica (pode ser caracterizada pelo mesmo material metálico) e uma ligação externa (caracterizada pela condução iônica através do eletrólito) (BROWN e HOLME, 2010; MEIRA, 2017).

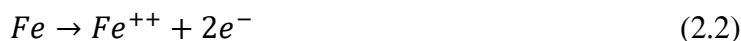
A Figura 2.3 apresenta esse fenômeno no concreto armado e expõe as reações parciais que se processam nas regiões anódica e catódica.

Figura 2.3: Célula de corrosão no concreto armado



Fonte: Adaptada de Martín-Pérez, 1999, p. 4.

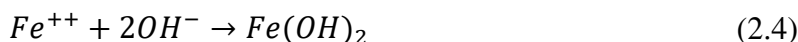
Como ilustrado, o ferro se oxida da seguinte forma:



Os elétrons livres movem-se através da barra para o catodo, enquanto os íons ferrosos são dissolvidos na solução de poros do concreto. Em estruturas normais de concreto, a redução acontece no oxigênio dissolvido nos poros (ROSENBERG et al., 1989; GULIKERS, 1996; apud MARTÍN-PÉREZ, 1999):



Os íons ferrosos se combinam com os íons hidroxilas:



O hidróxido de ferro pode ser futuramente oxidado e formando outros produtos de corrosão. A transformação dos íons ferrosos em estados de oxidação mais elevados é acompanhada por um aumento de volume. Dependendo do nível de oxidação, o ferro pode expandir até apresentar seis vezes o seu volume original (MARTÍN-PÉREZ, 1999).

Como visto em 2.1, os íons cloreto penetram localmente, ou seja, a presença destes íons provoca uma dissolução pontual desta película e, dada a presença de água e oxigênio, facilita o início do processo corrosivo. Esta ruptura da camada protetora de passivação pelos cloretos gera pequenas áreas ativas, com um pH muito baixo, em torno de 3, que funcionam como anodo e nas quais o metal é dissolvido. Nas proximidades há a zona catódica, de elevado pH, em torno de 13,5, onde ocorre a redução do oxigênio. Vale ressaltar que os íons cloreto não são consumidos nas reações de corrosão permanecendo sempre presentes (PEREIRA, 2001).

Em linhas gerais, a corrosão das armaduras caracteriza-se por ser um processo físico-químico gerador de óxidos e hidróxidos de ferro, denominados de produtos de corrosão, que ocupam um volume significativamente superior ao volume original das barras. Esse fenômeno de natureza expansiva pode levar ao aparecimento de elevadas tensões de tração no concreto, ocasionando a fissuração e o posterior lascamento do cobrimento do material. Todos esses fatores causam uma perda de seção transversal e de aderência entre a armadura e o concreto, inabilitando a transferência de tensões entre os materiais, podendo levar o elemento estrutural ao colapso (DE OLIVEIRA ANDRADE, 2001).

2.2. TRANSPORTE DE CLORETOS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Em estruturas prontas (isto é, o concreto encontra-se no estado endurecido), os cloretos do ambiente podem penetrar na estrutura através dos mecanismos clássicos de penetração da água e transporte de íons. Segundo Helene (1993), os cloretos potencialmente agressivos encontram-se na natureza na forma dissolvida em água, pois, como cristal sólido não apresenta risco elevado para as estruturas, já que a porosidade do concreto tem dimensões menores que as dos cristais usuais.

O transporte de cloretos para o interior da estrutura pode ocorrer através dos seguintes mecanismos: difusão, convecção, permeabilidade e migração de íons por ação de um campo elétrico.

Além desses mecanismos, Helene (1993) também considera alguns que poderiam atuar em fachadas, como a gravidade, a energia cinética das gotas e o vento, pois, segundo ele, estes três mecanismos poderiam gerar uma pressão que seria suficiente para empurrar a água com cloretos para o interior da estrutura.

2.2.1. Difusão

O fluxo químico é o processo onde íons e/ou moléculas movimentam-se sob a influência de um gradiente químico (diferenças de concentração), na ausência de qualquer gradiente hidráulico. A difusão dos íons cloretos ocorre devido à existência de um gradiente de concentração de íons cloretos entre a superfície exposta e a solução nos poros da matriz cimentícia.

Em 1855, Fick criou um modelo analítico para difusão em materiais permeáveis, elaborando a Primeira e a Segunda Lei de Fick.

O artigo de Collepardi et al., publicado em 1972 (em inglês – ele foi publicado em italiano em 1970), é provavelmente o primeiro documento onde os autores usam uma equação matemática para quantificar a penetração de cloretos. Collepardi et al. (1972) utiliza a Segunda Lei de Fick para quantificar a penetração dos cloretos a partir do coeficiente de difusão (Equação 2.5).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.5)$$

Onde:

C	concentração de cloretos no tempo t [$kmol/m^3$]
D	coeficiente de difusão de cloretos [m^2/s]
x	distância a partir da superfície [m]
t	tempo [s]

A solução para essa equação, considerando material sólido, semi-infinito, com concentração superficial constante do íon na solução externa é:

$$C_x - C_0 = (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2.6)$$

Onde:

C_x	concentração de cloretos na profundidade x a partir da superfície do concreto no tempo t [$kmol/m^3$]
C_s	concentração de cloretos na superfície do concreto, admitida constante [$kmol/m^3$]
C_0	concentração inicial de cloretos no interior do concreto [$kmol/m^3$]
D	coeficiente de difusão de cloretos [m^2/s]
x	distância a partir da superfície [m]
t	tempo [s]

Erf é uma função complementar do erro de Gauss e está disponível em tabelas.

A 2ª Lei de Fick é amplamente utilizada para avaliar o transporte de cloreto no concreto. No entanto, as curvas de penetração de cloreto medidas em amostras de concreto não têm a típica forma suave prevista por essa lei. A difusão de um material saturado, como já visto, não é o único fenômeno envolvido na penetração de cloretos. Além disso, as leis de Fick para a difusão assumem que o substrato é homogêneo, isotrópico e que é um meio inerte. O concreto é não homogêneo, anisotrópico e reativo.

2.2.2. Convecção

Segundo Helene (1993), a ascensão capilar, ou convecção, pode ser modelada pela clássica Lei de Jurin:

$$A = \frac{2\nu}{r\gamma} \quad (2.7)$$

Onde:

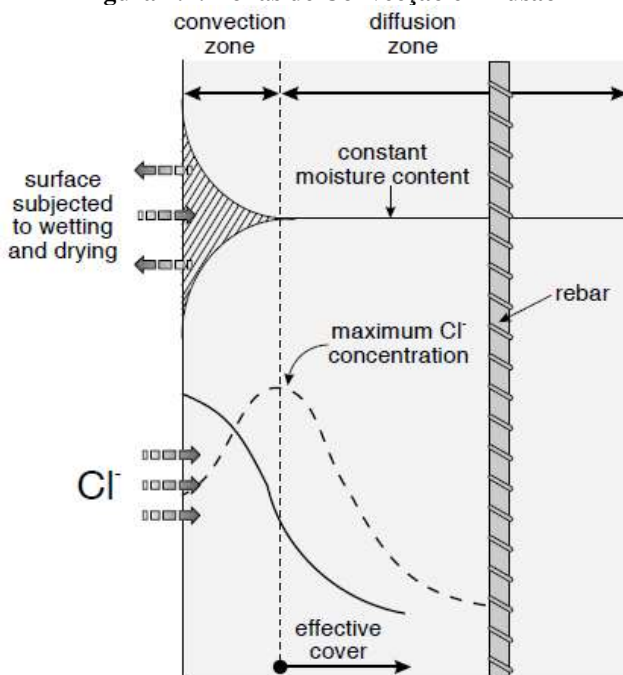
A	altura ou penetração da água no capilar $[m]$
ν	tensão superficial da água ($\cong 75 \times 10^{-4}$) $[kg/m]$
r	raio do capilar $[m]$
γ	massa específica da água $[kg/m^3]$

O diâmetro dos capilares do concreto é variável no tempo, pois dependem do grau de hidratação do cimento, da composição química desse cimento, de adições e da relação água/cimento. Portanto, fica difícil a aplicação da Equação 2.7.

Segundo Helene (1993), a absorção capilar da água no concreto é um dos fatores mais difíceis de serem controlados, pois trata-se de um material hidrófilo que tem grande afinidade com a água. Quando uma superfície do concreto parcialmente saturado está molhada, a água é rapidamente absorvida por sucção capilar levando íons cloreto dissolvidos. Durante os períodos de seca, a água na superfície evapora deixando os íons cloreto para trás nos poros do concreto. Devido a esses dois fenômenos, a concentração de cloretos flutuará perto da superfície e atingirá um valor máximo alguns milímetros dentro do concreto.

Devido a esses fatores Tuutti (1993) separou uma zona de convecção e uma de difusão, como na Figura 2.4.

Figura 2.4: Zonas de Convecção e Difusão



Fonte: Martín-Pérez, 1999, p. 27.

A zona de convecção depende da qualidade do concreto e das condições de exposição e varia de 10mm a 20mm.

2.2.3. Permeabilidade

Segundo Helene (1993), a permeabilidade, em regime laminar, estacionário e não turbulento, pode ser modelada pela Lei de Darcy:

$$V = k \frac{H}{e} = \frac{Q}{S} \quad (2.8)$$

Onde:

- V velocidade de percolação da água [m/s]
- k coeficiente de permeabilidade da água no concreto [m/s]
- H pressão de água [m.c.a.]
- e espessura de concreto percolado pela água [m]
- Q vazão de água percolada [m³/s]
- S área da superfície confinada por onde percola a água [m²]

Desenvolvendo a Equação 2.9:

$$e = \frac{kH}{V} \therefore e = \frac{kH}{de/dt} \therefore e \, de = kH \, dt \therefore$$

$$\int_0^e e \, de = \int_0^t kH \, dt \therefore \frac{e^2}{2} = kHt$$

$$k = \frac{e^2}{2Ht} \quad (2.9)$$

Onde:

k	coeficiente de permeabilidade da água no concreto [m/s]
e	espessura de concreto percolado pela água [m]
H	pressão de água [m.c.a.]
t	período de tempo considerado [s]

Segundo Helene (1993), o coeficiente de permeabilidade k da pasta a um 1 dia de idade pode ser 10^4 vezes superior ao valor correspondente aos 7 dias e até 10^6 vezes maior que o coeficiente da mesma pasta a 28 dias. Após 28 dias pode-se considerar que ele permanece constante.

Assim, pode-se afirmar que quanto mais tarde a estrutura for colocada em ambiente agressivo, melhor e mais durável ela será (pelo menos no aspecto permeabilidade). Na prática esse fato ocorre normalmente pois, as estações de tratamento de água, de esgotos, os tanques industriais, os reservatórios, as estruturas marítimas, as canaletas, e outros elementos, quando novos, raramente são colocados em serviço antes de 28 dias (geralmente meses depois), então o coeficiente de permeabilidade que será válido, será o de 28 dias.

Sendo assim, considerando que a estrutura será colocada em serviço apenas quando ela tiver mais de 28 dias de idade, a influência da permeabilidade será mínima. Esta é razão pela qual os modelos de previsão de vida útil não levam em consideração a permeabilidade do concreto.

2.2.4. Migração de íons

Nesse mecanismo, segundo De Oliveira Andrade (2001), a movimentação de íons se dá a partir do estabelecimento de um campo elétrico entre duas partes da estrutura quando ocorre uma mínima diferença de potencial causada por pequenas e eventuais cargas elétricas (correntes de fuga). Como essas cargas elétricas não são usuais no concreto, esse mecanismo não é levado em consideração nos modelos de vida útil.

2.3. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS E CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS

A profundidade de penetração e o teor de cloretos são altamente dependentes das características ambientais e as condições de exposição em que a estrutura de concreto armado está inserida.

2.3.1. Temperatura

Na grande maioria dos processos de natureza química, a temperatura age aumentando a cinética da reação. Por essa razão, estruturas localizadas em regiões quentes deterioram mais rapidamente do que estruturas inseridas em regiões frias e temperadas (NEVILLE, 1997).

Para De Oliveira Andrade (2001) a questão de temperatura envolve a mudança de temperatura atmosférica, a radiação solar, as características térmicas do material, a velocidade do vento e as trocas de calor observadas dentro dos ambientes.

2.3.2. Umidade Relativa

Segundo Perepérez et al. (1987, apud DE OLIVEIRA ANDRADE, 2001) a umidade relativa do ambiente pode ser relacionada diretamente com a quantidade de água presente no interior do concreto, desde que o mesmo não esteja saturado. Como o transporte de íons se dá em meio aquoso, o aumento da quantidade de água no concreto facilita a movimentação dos íons cloreto através do cobrimento. No entanto, observa-se que esse aumento da umidade facilita a movimentação até certo ponto, pois em poros quase saturados, o acesso de oxigênio é limitado o que dificulta a corrosão.

2.3.3. Condições de Exposição

O Quadro 2.1 apresenta as zonas de exposição e as suas características no que diz respeito a corrosão de armaduras por cloretos.

Quadro 2.1: Características das diferentes zonas de exposição

Área	Características
Zona de atmosfera marinha (névoa salina)	O concreto nunca está diretamente em contato com a água do mar, porém é atingido pela névoa salina que vem do oceano. O nível de cloretos pode cair à medida que as construções se afastam do mar, mas, em alguns casos, dependendo do tipo da costa e da direção preferencial dos ventos, a névoa salina pode penetrar até muitos quilômetros do litoral.
Zona de respingo de marés	Localiza-se acima do nível de maré alta, estando sujeita a ação direta da água do mar, através da molhagem do concreto pelas ondas. Essa área está bastante sujeita à deterioração através da penetração de agentes agressivos pelo cobrimento do concreto. O teor de umidade, juntamente com a presença de oxigênio, são fatores que contribuem para a deterioração das estruturas.
Zona de variação das marés	O concreto está submetido à ação dos ciclos de molhagem e secagem, onde há uma combinação dos mecanismos de absorção e difusão de íons no concreto, restando uma grande quantidade de cloretos no interior do material.
Zona submersa	O processo de difusão de cloretos é o único mecanismo de transporte atuante.

Fonte: Adaptado de De Oliveira Andrade, 2001, p. 34.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica as zonas marinha, de respingo de marés e submersa de acordo com sua classe de agressividade ambiental e o risco de deterioração da estrutura, conforme Quadro 2.2.

Quadro 2.2: Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha Industrial	Grande
IV	Muito forte	Industrial Respingos de maré	Elevado

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 17).

2.4. Limitações e Níveis da Modelagem

Uma significativa parcela da comunidade técnico-científica mundial está interessada no estabelecimento de parâmetros que possibilitem adequadamente a modelagem de diversos fenômenos de degradação que ocorrem nas estruturas de concreto (UJI et al., 1990; HELENE, 1993; MEJLBRO, 1996; apud DE OLIVEIRA ANDRADE, 2001).

Mehta (1994 apud DE OLIVEIRA ANDRADE, 2001) afirma que a modelagem dos parâmetros intervenientes nas diversas formulações é difícil de ser realizada, em virtude da complexidade existente entre as diversas formas de deterioração. Segundo esse autor, três elementos são fundamentais para se estabelecer um modelo confiável para predição da vida útil das estruturas:

- Definição precisa do material;
- Definição precisa do meio ambiente;
- Arquivo de dados de resultados de ensaios acelerados de durabilidade.

Observa-se que existe uma grande dificuldade para obtenção desses três fatores, pois:

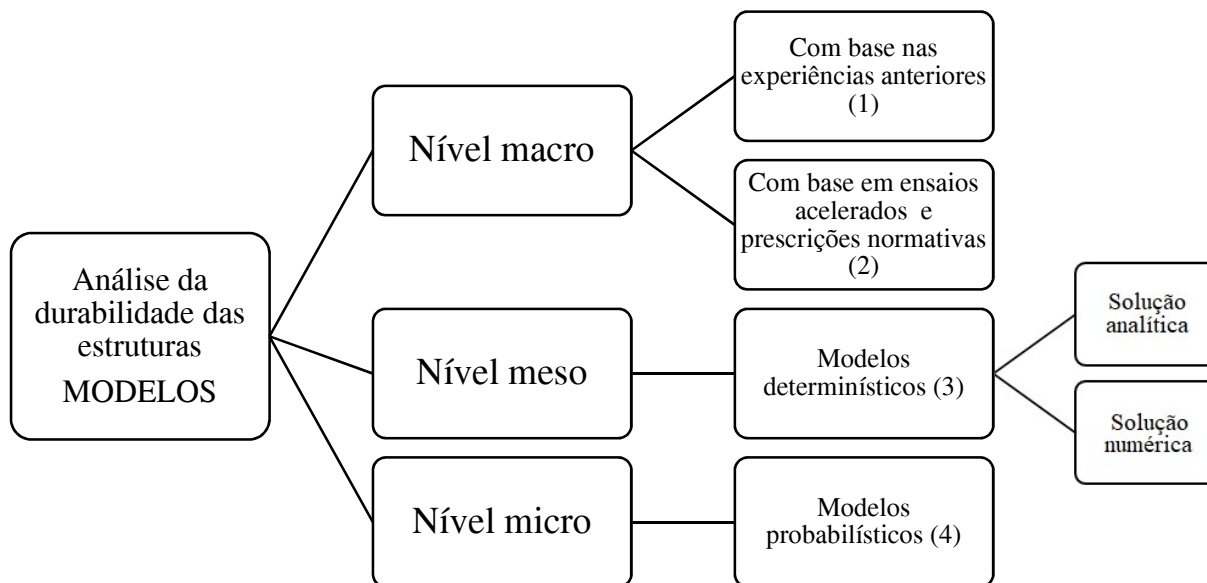
- O concreto é um sistema complexo que muda temporalmente, principalmente com relação aos seus aspectos microestruturais, portanto, a modelagem do comportamento do concreto apresenta uma elevada variabilidade;
- A modelagem dos diversos tipos de ambiente é complexa;
- Dificuldade de se modelar o comportamento real do concreto através de ensaios acelerados em laboratório.

Uma publicação do CEB (1997; apud DE OLIVEIRA ANDRADE, 2001) estabelece três níveis de modelagem: nível macro, meso e micro.

Helene (1997 apud DE OLIVEIRA ANDRADE, 2001) descreve diferentes métodos de análise da durabilidade: com base nas experiências anteriores, com base em ensaios acelerados, através de métodos determinísticos e através de modelos probabilísticos.

Nilsson (2001) aborda dois tipos de métodos: os métodos empíricos e os métodos físicos. Segundo ele, nesses métodos, alguns modelos podem ter dados de entrada que parecem iguais aos outros, mas podem levar a resultados completamente diferentes.

Unindo essas três divisões, é possível estabelecer um organograma de modelos em diferentes níveis (Figura 2.5).

Figura 2.5: Modelos de análise da durabilidade das estruturas

Fonte: Elaborada pela autora.

Onde:

- (1) É feito um resgate de dados de projeto de obras construídas e que apresentaram um desempenho satisfatório para servirem de referencial na construção de novas estruturas.
- (2) São utilizadas prescrições normativas, sem formulações matemáticas, com base na classificação ambiental (ambiente urbano, salino, industrial, rural...) e dados do material (tipo e quantidade de cimento, relação água/cimento, cura...) e ensaios acelerados em laboratório.
- (3) Os modelos determinísticos têm como princípio básico o estudo do transporte de gases, íons e massa, através da rede de poros do concreto, utilizando equações de Darcy, Arrhenius, Laplace e as Leis de Fick. Nesses modelos, algumas variáveis são consideradas constantes no tempo e outras são desconsideradas. Quando solucionado analiticamente, esse procedimento pode levar a um nível de incerteza muito grande, que pode prejudicar os resultados obtidos. Em contrapartida, as soluções numéricas, onde são utilizados processos numéricos iterativos, tem evoluído bastante nos últimos anos. Isso deve-se ao advento de programas computacionais cada vez mais sofisticados, que possibilitam a realização de cálculos que antes eram considerados muito complexos.
- (4) Observa-se que na Engenharia muitos problemas envolvem processos naturais e fenômenos que são inerentemente aleatórios, e que certas variáveis envolvidas não podem ser consideradas

como constantes no tempo. A deterioração de estruturas de concreto armado pelo ingresso de cloretos é um processo complexo e depende de um grande número de variáveis. Segundo Saasshouh e Lounis (2012; apud DOMINICINI, 2016), as principais fontes de incerteza na modelagem de vida útil são: incerteza inerente das variáveis do modelo (concentração limite de cloretos, concentração superficial, cobrimento, coeficiente de difusão, etc.), incerteza no modelo físico, incerteza estatística e incerteza na medição. Assim, considerar o tempo para o fim de vida útil como um parâmetro determinístico não é o mais apropriado e uma abordagem probabilística tende a gerar resultados mais confiáveis.

Capítulo 3:

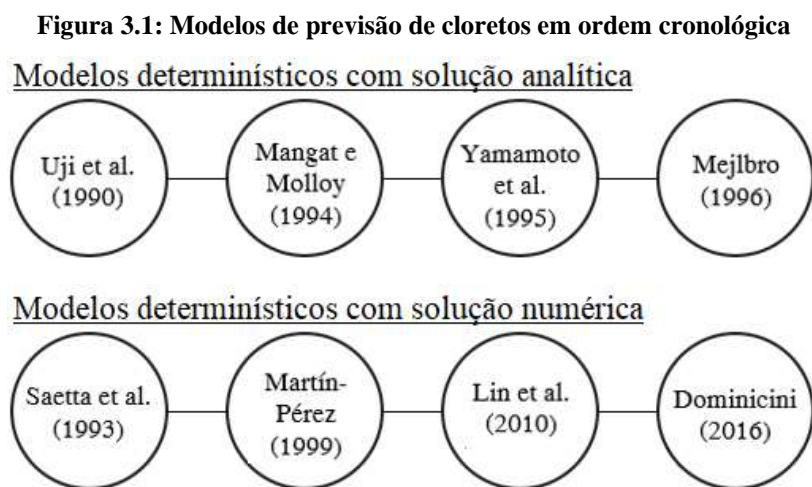
**MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS
ATACADAS PELA CORROSÃO DE ARMADURAS – ETAPA DE
INICIAÇÃO**

3. MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS ATACADAS PELA CORROSÃO DE ARMADURAS – ETAPA DE INICIAÇÃO

O estudo intensivo sobre a corrosão iniciou-se na década de 70. A partir daí, surgiram uma variedade de modelos de previsão de vida útil que foram desenvolvidos para auxiliar os engenheiros na concepção de estruturas de concreto armado duráveis.

Depois do artigo de Collepardi et al. (1972) descrito anteriormente, a maioria dos modelos que surgiram seguiram utilizando a Segunda Lei de Fick, porém com equações cada vez mais complexas e métodos numéricos cada vez mais precisos.

Com o intuito de mostrar um pouco dessa evolução, esse capítulo trata da análise de alguns modelos. Foi visto em 2.2.2 que os modelos determinísticos podem ter solução analítica ou numérica. A Figura 3.1 mostra as publicações que aqui serão abordadas divididas de acordo com sua solução.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.1. MODELOS DETERMINÍSTICOS COM SOLUÇÃO ANALÍTICA

3.1.1. Modelo de Uji et al. (1990)

A fim de considerar o efeito das condições ambientais na penetração de cloretos no concreto, Uji et al. (1990) apresentaram um modelo que considera a variação da concentração superficial de cloretos no tempo:

$$C_s = k\sqrt{t} \quad (3.1)$$

Onde:

C_s	concentração superficial de cloretos [% do peso do concreto]
k	teor de cloretos na superfície do elemento estrutural no final do primeiro ano de exposição do mesmo ao meio ambiente [$1/\sqrt{s}$]
t	tempo de exposição [s]

Os intervalos de valores encontrados pelos autores para k foram:

$k = 18,2 - 23,5 \times 10^{-6} [1/\sqrt{s}]$ para a zona de maré.

$k = 5,31 - 16,6 \times 10^{-6} [1/\sqrt{s}]$ para a zona de respingos.

$k = 1,56 - 5,57 \times 10^{-6} [1/\sqrt{s}]$ para a zona atmosférica.

A adoção da hipótese de crescimento da concentração superficial de cloretos no tempo corresponde ao fenômeno que se observa efetivamente nas estruturas.

De acordo com Uji et al. (1990), a solução analítica para a concentração de cloretos no tempo é:

$$C(x, t) = k\sqrt{t} \left\{ e^{-\frac{x^2}{4Dt}} - \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \right\} \quad (3.2)$$

Onde:

$C(x, t)$	concentração de cloretos na profundidade x a partir da superfície do concreto em um dado tempo t [%]
x	distância a partir da superfície do concreto [m]
t	tempo de exposição [s]
D	coeficiente de difusão de cloretos [m^2/s]
erf	função do erro de Gauss

3.1.2. Modelo de Mangat e Molloy (1994)

Os autores consideraram o coeficiente de difusão dependente do tempo (mudanças microestruturais que ocorrem continuamente no interior do concreto). O coeficiente de difusão pode ser expresso a partir de:

$$D(t) = D_0 t^{-m} \quad (3.3)$$

Onde:

- $D(t)$ coeficiente de difusão em um determinado tempo t [m^2/s]
- D_0 coeficiente de difusão inicial de cloretos [m^2/s]
- m coeficiente que depende da relação a/c ($m = 2,5a/c - 0,6$)

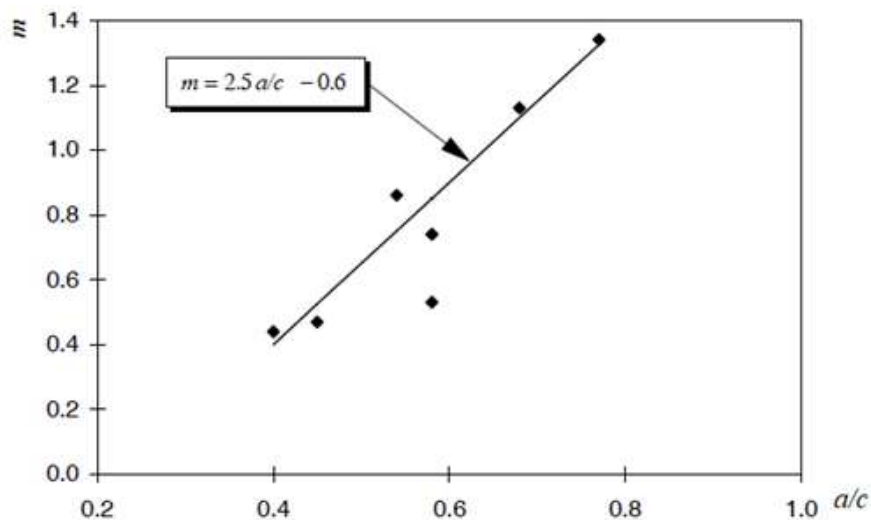
A partir do coeficiente de difusão acima, a formulação proposta pelo autor para a concentração de cloretos é:

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{\frac{D_0}{1-m} t^{1-m}}} \right) \right] \quad (3.4)$$

Onde:

- $C(x, t)$ concentração de cloretos na profundidade x a partir da superfície do concreto em um dado tempo t [%]
- x distância a partir da superfície do concreto [m]
- t tempo de exposição [s]
- C_s concentração superficial de cloretos (admitida como sendo constante) [%]
- D_0 coeficiente de difusão inicial de cloretos [m^2/s]
- m coeficiente que depende da relação a/c ($m = 2,5a/c - 0,6$)

O valor de m foi determinado através de ajustes de dados experimentais, tendo relação linear com a relação água/cimento. A Figura 3.2 mostra essa relação.

Figura 3.2: Relação entre o coeficiente m e a relação água/cimento do concreto

Fonte: Adaptada de Mangat e Molloy (1994)

3.1.3. Modelo de Yamamoto et al. (1995)

Yamamoto et al. (1995) publicaram um trabalho propondo uma metodologia que contemplasse aspectos relacionados tanto às características do concreto quanto às condições de exposição da estrutura.

A equação da solução é a mesma da Segunda Lei de Fick (Equação 2.6), no entanto, ao contrário de outros trabalhos, este fez uma análise mais específica do material (concreto) para determinar o coeficiente de difusão.

Dados de entrada considerados:

- Tipo de cimento;
- Resistência à compressão (f_{ck});
- Influência do abatimento (a_1);
- Influência da localização ambiental (a_2);
- Influência da temperatura média (a_3);

O coeficiente de difusão é determinado por todos esses dados de entrada:

$$\log D = \frac{7,12 - \log(a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot f(\text{tipo de cimento}, f_{ck}))}{3,56} \quad (3.5)$$

Apesar da interessante base teórica apresentada pelo modelo, observa-se que o mesmo depende de uma parametrização adequada de seus componentes, tornando-o de difícil implementação.

3.1.4. Modelo de Mejlbro (1996)

Mejlbro (1996) deu um passo importante na evolução da modelagem por considerar tanto o coeficiente de difusão quanto a concentração superficial de cloretos como sendo variáveis no tempo. A formulação proposta pelo autor para a concentração de cloretos é:

$$C(x, t) = C_i + S \left[(t - t_{ex}) D_{aex} \left(\frac{t_{ex}}{t} \right)^\alpha \right]^p \psi_p \left(\frac{x}{2 \sqrt{(t - t_{ex}) D_{aex} \left(\frac{t_{ex}}{t} \right)^\alpha}} \right) \quad (3.6)$$

Onde:

$C(x, t)$	concentração de cloretos na profundidade x a partir da superfície do concreto em um dado tempo t [%]
x	distância a partir da superfície do concreto [m]
t	tempo de exposição [s]
C_i	concentração inicial de cloretos [%]
S e p	constantes que dependem de ajustes experimentais
t_{ex}	tempo desde a primeira exposição da estrutura aos cloretos [s]
D_{aex}	coeficiente de difusão de cloretos no tempo t_{ex} [m^2/s]
α	coeficiente que depende das características do concreto
ψ_p	função de Mejlbro

A função de Mejlbro foi tabulada pelo autor em Mejlbro (1996). O valor de D_{aex} pode ser obtido através de investigações experimentais antes de se construir a estrutura. Contudo, caso tal parâmetro não tenha sido medido, pode-se usar:

$$D_{aex} = 5000 - \sqrt{\frac{10}{a/c}} \quad (3.7)$$

Onde:

D_{aex}	coeficiente de difusão de cloretos no tempo t_{ex} [m^2/s]
a/c	relação água/cimento

O valor de α depende da relação água/cimento igual ao m de Mangat e Molloy (1994):

$$\alpha = 1,65 - 3 a/c \quad (3.8)$$

3.1.5. Conclusões sobre os modelos com soluções analíticas

A partir dos modelos que foram expostos, pode-se concluir que ocorreu uma evolução e um cuidado da parte dos pesquisadores em obter uma formulação que contemplasse a influência do coeficiente de difusão e da concentração superficial de cloretos.

Para o coeficiente de difusão, destacou-se a influência do tempo de exposição e da relação água/cimento do material.

No que diz respeito a concentração superficial de cloretos, destacou-se que ela tende a aumentar de acordo com tempo de exposição.

3.2. MODELOS DETERMINÍSTICOS COM SOLUÇÃO NUMÉRICA

Para entender as equações que regem os modelos a seguir, é importante destacar que existem duas definições para o coeficiente de difusão:

- D_c^* (coeficiente de difusão aparente): associado a um gradiente de concentração de cloretos livres.
- D_c (coeficiente de difusão intrínseco): associado ao gradiente de concentração total de cloretos em todo o volume médio de poros (cloretos livres e ligados).

As soluções analíticas que utilizam a 2ª Lei de Fick são válidas para as seguintes considerações:

- Problema unidimensional em um corpo semi-infinito;
- Coeficiente de difusão aparente constante (ou apenas função do tempo);
- Condições de contorno simplificadas.

Porém, com essas condições, é possível obter uma solução linear que poderia ser aplicada em uma avaliação simplificada da difusão de cloretos (como visto nos modelos analíticos), mas ela não é capaz de descrever as condições gerais existentes na natureza. É sabido que temperatura, umidade relativa e hidratação do cimento causam variações no coeficiente de difusão no tempo e no espaço.

Além disso, deve ser avaliado o transporte de cloretos para concretos que não estão imersos em solução salina.

Para considerar esses efeitos, a 2ª Lei de Fick deve ser integrada e a dependência do coeficiente de difusão com os parâmetros do material deve ser definida. E isso só pode ser feito com as soluções numéricas.

O primeiro modelo a ser analisado, é o de Saetta et al. (1993). Antes dessa publicação, pouco tinha sido feito no sentido de refinar os modelos de previsão de vida útil. Esses autores desenvolveram uma equação para o coeficiente de difusão que é empregada até hoje nos modelos mais recentes.

3.2.1. Modelo de Saetta et al. (1993)

3.2.1.1. Coeficiente de difusão de cloretos

A partir de vários dados experimentais presentes na literatura, pode-se definir um valor para o coeficiente de difusão intrínseco de referência. $D_{c,ref}$ foi avaliado para as seguintes considerações: temperatura de 23°C, umidade relativa de 100%, e grau de hidratação do cimento (por exemplo, após 28 dias de maturação em condições normais).

A relação a seguir pode ser usada:

$$D_c = D_{c,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t_e) \cdot f_3(h) \quad (3.9)$$

Onde:

D_c	coeficiente de difusão intrínseco [m^2/s]
$D_{c,ref}$	coeficiente de difusão intrínseco de referência [m^2/s]
$f_1(T)$	fator de dependência da temperatura para o coeficiente de difusão de cloretos
$f_2(t_e)$	fator de dependência do tempo de exposição para o coeficiente de difusão de cloretos
$f_3(h)$	fator de dependência da umidade para o coeficiente de difusão de cloretos

$f_1(T)$ é determinado de acordo com a Lei de Arrhenius:

$$f_1(T) = e^{\left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (3.10)$$

Onde:

T	temperatura real [K]
U	energia de ativação do processo de difusão [kJ/mol]
R	constante dos gases ($8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ}/(K \cdot \text{mol})$)
T_0	temperatura de referência (296 K)

A difusão de cloretos no concreto diminui com um aumento do grau hidratação de cimento e tende para um valor final. $f_2(t_e)$ informa essa condição:

$$f_2(t_e) = \zeta + (1 - \zeta) \cdot \left(\frac{28}{t_e}\right)^{1/2} \quad (3.11)$$

Onde:

t_e tempo de exposição [dias]
 ζ coeficiente que varia de 0 a 1

ζ é a relação entre o coeficiente de difusão para $t_e \rightarrow \infty$ e o coeficiente de difusão para $t_e = 28$ dias. O endurecimento é rápido para concretos com uma baixa relação a/c, então, ζ é assumido como perto de 1. Para concretos com uma maior relação a/c, ζ é mais baixo.

Para analisar a difusão de cloretos numa situação de parcialmente saturado, é necessário saber a relação entre D_i e a umidade relativa h no concreto:

$$f_3(h) = \left[1 + \frac{(1 - h)^4}{(1 - h_c)^4}\right]^{-1} \quad (3.12)$$

Onde:

h umidade relativa real [%]
 h_c umidade com que o coeficiente D_i está no meio do caminho entre o máximo e o mínimo [%]

O coeficiente de difusão aparente se relaciona com o coeficiente de difusão intrínseco da seguinte forma:

$$D_c^* = D_c / \delta \quad (3.13)$$

O coeficiente δ é o chamado fator de capacidade, que pode ser considerado como uma medida da capacidade de ligação do meio poroso saturado com os íons cloretos. Os valores de δ geralmente variam de 0,5 a 1.

3.2.1.2. Transporte de cloretos por difusão e convecção

Quando o concreto é submetido a ciclos de molhagem e secagem, o movimento de água no interior dos poros é intenso. Assim, a aplicação do conceito de uma única difusão concentrada parece inadequado, pois, nesse caso, uma certa quantidade de cloretos em solução é arrastada pelo fluxo

de água e isso faz com que um termo adicional seja inserido do processo de difusão (Equação 3.14). O transporte de cloretos no fluxo de água é o conceito do termo convecção.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_t}{\partial x} \right) + \frac{C_t}{\delta} \cdot \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3.14)$$

Onde:

C_t	concentração total de cloretos [kg/m^3]
t	tempo [t]
x	distância da superfície do concreto [m]
D_c^*	coeficiente de difusão aparente [m^2/s]
δ	fator de capacidade
w	teor de água efetivo [%]

3.2.1.3. Acoplamento com difusão de calor e de umidade

O mecanismo de difusão de cloretos no concreto é estritamente ligado com a difusão acoplada da umidade relativa e do calor.

A Equação para a transferência de calor é:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.15)$$

Onde:

T	temperatura [K]
ρ	massa específica do concreto [kg/m^3] (assumido constante)
c	calor específico do concreto [$J/(kg \cdot K)$] (assumido constante)
λ	condutividade térmica [$W/(m \cdot K)$] (assumido constante)

A Equação para o fluxo de umidade é:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h(h, T, t_e) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{dh_s}{dt} + K \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3.16)$$

Onde:

h	umidade [%]
D_h	coeficiente de difusão de umidade [m^2/s]
dh_s/dt	variação da umidade relativa pela “autosecagem” (pode ser desprezado)
$K \cdot dT/dt$	termo que acopla a difusão de calor (pode ser desprezado)

A difusão de umidade é não linear. A correlação entre a umidade relativa e o conteúdo de água livre é assegurado pelas isotermas de sorção (processo de molhagem, absorção e adsorção

ocorrendo simultaneamente) e dessorção (processo de secagem, onde uma substância é liberada em determinada superfície).

Isoterma de sorção:

$$w = w_{sat} \cdot h \cdot (1,16 \cdot h^3 - 1,05 \cdot h^2 - 0,11 \cdot h + 1) \quad (3.17)$$

Onde:

w	teor de água efetivo [%]
w_{sat}	teor de água evaporável (sempre maior que w)
h	umidade [%]

Isoterma de dessorção:

$$w = w_{sat} \cdot h \quad (3.18)$$

3.2.1.4. Condições de contorno

Assume-se que o fluxo de umidade, o fluxo de calor e o fluxo de cloretos entre a superfície e o ambiente é calculado por:

$$\underline{n} \times \underline{J}_h = B_h \cdot (h - h_{en}) \quad (3.19)$$

$$\underline{n} \times \underline{q}_T = B_T \cdot (T - T_{en}) \quad (3.20)$$

$$\underline{n} \times \underline{J}_C = B_C \cdot (C_f - C_{en}) + C_{en} \cdot \underline{n} \cdot \underline{J}_w \quad (3.21)$$

Onde:

\underline{n}	vetor normal a superfície
\underline{J}_h	fluxo de umidade [$1/(m^2 \cdot s)$]
\underline{q}_T	fluxo de calor [W/m^2]
\underline{J}_C	fluxo de cloretos [$kg/(m^2 \cdot s)$]
\underline{J}_w	fluxo de água [m/s] (considerado igual a 0 nas fases de secagem)
B_h	coeficiente de transferência de umidade na superfície [$1/(m^2 \cdot s)$] (considerado: $1,0(m^2 \cdot s)^{-1}$)
B_T	coeficiente de transferência de calor na superfície [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$] (considerado: $0,07(m^2 \cdot s)^{-1}$)
B_C	coeficiente de transferência de cloretos na superfície [m/s] valores variam de 1 a 6 m/s
T	temperatura da superfície [$^\circ C$]
T_{en}	temperatura do ambiente [$^\circ C$]
h	umidade relativa da superfície [%]
h_{en}	umidade relativa do ambiente [%]
C_f	concentração de cloretos na solução [kg/m^3]

C_{en} concentração de cloretos no ambiente [kg/m³]

3.2.2. Modelo de Martín Pérez (1999)

O segundo modelo a ser analisado, e que seguiu em parte o que foi feito por Saetta et al. (1993), é o que consta na tese de Beatriz Martín-Pérez, de 1999.

Por questões de simplificação, foi considerado que o concreto não apresentava fissuras e que o problema era no domínio bidimensional.

3.2.2.1. Coeficiente de difusão de cloretos

É utilizada a Equação 3.9 para o cálculo do coeficiente de difusão. As equações dos fatores de influência da temperatura e da umidade, $f_1(T)$ e $f_3(h)$, são iguais as Equações 3.10 e 3.12. Porém, o fator de influência do tempo de exposição ($f_2(t_e)$) é calculado de forma diferente:

$$f_2(t_e) = \left(\frac{t_{ref}}{t_e} \right)^m \quad (3.22)$$

Onde:

t_{ref} tempo de exposição em que $D_{c,ref}$ foi medido [s]
 m fator de redução de idade

O chamado fator de redução de idade (m) é o mesmo coeficiente usado por Mangat e Molloy (1994) (Figura 3.2).

3.2.2.2. Transporte de cloretos por difusão

Martín-Pérez (1999) afirma que as concentrações de cloretos totais, ligados e livres no concreto se relacionam da seguinte forma:

$$C_{tc} = C_{bc} + w_e C_{fc} \quad (3.23)$$

Onde:

C_{tc} concentração total de cloretos [kg/m³ de concreto]
 C_{bc} concentração de cloretos ligados [kg/m³ de concreto]
 C_{fc} concentração de cloretos livres [kg/m³ de concreto]
 w_e teor de água evaporável [%]

A variação por difusão da concentração total de cloretos ao longo do tempo é dada por:

$$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) \quad (3.24)$$

Em que:

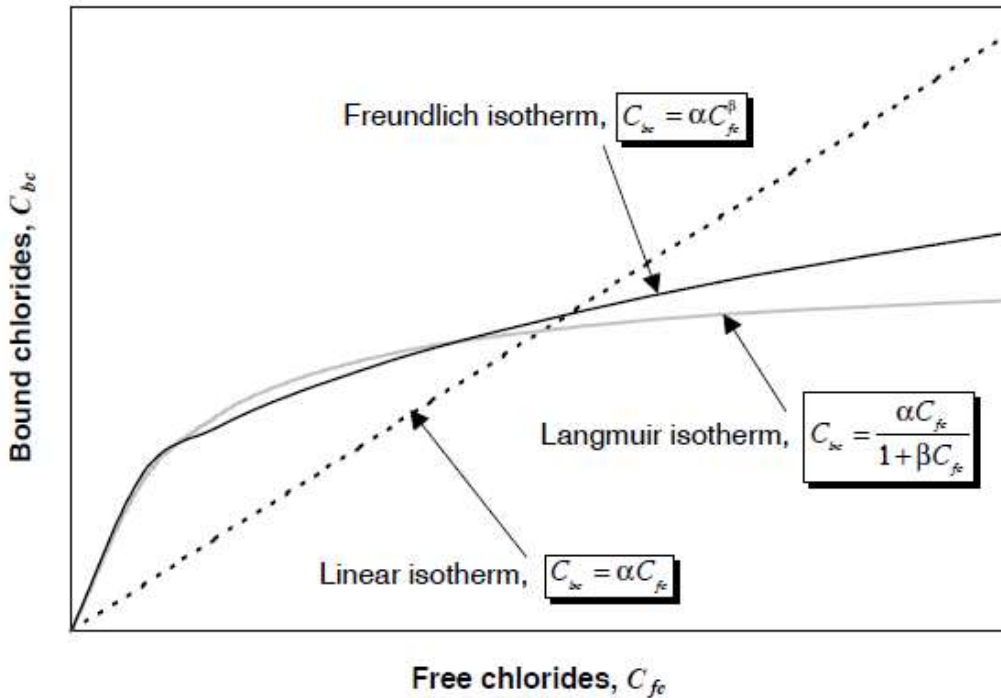
$$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}} \quad (3.25)$$

Onde:

- D_c^* coeficiente de difusão aparente [m^2/s]
 D_c coeficiente de difusão intrínseco [m^2/s]
 w_e teor de água evaporável [%]
 $\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}$ capacidade de ligação da matriz cimentícia

As curvas isotermas descrevem a relação entre íons livres e ligados no concreto para uma dada temperatura. Existem na literatura algumas curvas teóricas que traduzem esse fenômeno. A Figura 3.3 apresenta as curvas teóricas mais utilizadas para descrever a combinação de cloretos e o Quadro 3.1 mostra as equações das isotermas de ligação.

Figura 3.3: Isotermas de ligação do cloreto



Fonte: Martín-Pérez (1999, p. 57)

Quadro 3.1: Equações das isotermas de ligação

Sem ligação		
$C_{bc} = 0$	$\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} = 0$	$D_c^* = D_c$
Isoterma linear		
$C_{bc} = \alpha C_{fc}$	$\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} = \alpha$	$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{\alpha}{w_e}}$
Isoterma de Langmuir		
$C_{bc} = \frac{\alpha C_{fc}}{1 + \beta C_{fc}}$	$\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} = \frac{\alpha}{(1 + \beta C_{fc})^2}$	$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{\alpha}{w_e + (1 + \beta C_{fc})^2}}$
Isoterma de Freundlich		
$C_{bc} = \alpha C_{fc}^\beta$	$\frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} = \alpha \beta C_{fc}^{\beta-1}$	$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \alpha \beta C_{fc}^{\beta-1}}$
α e β são valores dependentes da matriz cimentícia		

Fonte: Elaborada pela autora

A curva de Freundlich é uma aproximação para concentrações acima de $0,355 \text{ kg/m}^3$, já a isoterma de Langmuir descreve bem esta relação quando a concentração de cloretos livres é menor que $1,733 \text{ kg/m}^3$.

3.2.2.3.. Difusão e convecção de cloretos

Como já visto, o fluxo de cloretos devido a absorção capilar pode ser matematicamente expresso como um produto da concentração de cloretos livres e o fluxo de umidade através do concreto.

Afirma-se que os íons cloretos entram no concreto pela mesma taxa que a água, de modo que a concentração da solução absorvente permanece constante.

Adicionando o termo de convecção a Equação 3.24, da mesma forma que foi feito em Saetta et al. (1993) na Equação 3.14, tem-se:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) \\
 &\quad - \frac{\partial}{\partial x} (w_e \cdot C_{fc} \cdot J_{mx}) - \frac{\partial}{\partial y} (w_e \cdot C_{fc} \cdot J_{my})
 \end{aligned}
 \tag{3.26}$$

Onde:

C_{fc}	concentração de cloretos livres [kg/m^3 de concreto]
D_c^*	coeficiente de difusão aparente [m^2/s]
w_e	teor de água evaporável [%]
J_{mx}	fluxo de água ao longo da direção x [$kg/m^3 \cdot s$]
J_{my}	fluxo de água ao longo da direção y [$kg/m^3 \cdot s$]

3.2.1.4. Acoplamento com difusão de calor e de umidade

A equação para o transporte de calor é a mesma utilizada por Saelens et al. (1993) (Equação 3.15) porém no domínio bidimensional.

A equação para o fluxo de umidade é similar a Equação 3.16 de Saelens et al. (1993) e é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial h_s}{\partial t} + K \frac{\partial T}{\partial t} \quad [1/s] \quad (3.27)$$

Onde:

D_h coeficiente de difusão de umidade [m^2/s]

As expressões $\partial h_s / \partial t$ e $K \partial T / \partial t$ foram desconsideradas por serem valores pequenos em condições normais de temperatura e umidade. A Equação para o transporte de umidade passa então a ser:

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad [1/s] \quad (3.28)$$

O coeficiente de difusão de umidade, é tido como função da umidade, da temperatura e do tempo de exposição.

$$D_h = D_{h,ref} \cdot F_1(T) \cdot F_2(t_e) \cdot F_3(h) \quad [m^2/s] \quad (3.29)$$

O fator de correção de temperatura é o mesmo da Equação 3.10, porém U é a energia de ativação do processo de difusão de umidade.

Para o fator de correção do tempo de exposição tem-se as seguintes equações:

$$F_2(t_e) = 0,3 + \sqrt{\frac{13}{t_e}} \quad (3.30)$$

$$t_e = t_0 + \int_{t_0}^t \beta_T \beta_h dt \quad (3.31)$$

$$\beta_T = e^{\left[\frac{U_h}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (3.32)$$

$$\beta_h = \frac{1}{1 + (7,5 - 7,5h^4)} \quad (3.33)$$

$$\frac{U_h}{R} = 4600 \left[\frac{30}{(T - 263)} \right]^{0,39} \quad (3.34)$$

Onde:

t_e	tempo de exposição [s]
t_0	tempo inicial em que o concreto foi exposto pela primeira vez a cloretos [s]
β_T	função que depende da temperatura
β_h	função que depende da umidade
U_h	energia de ativação do processo de difusão de umidade [kJ/mol]
T_{ref}	temperatura de referência [K]
β_T	função que depende da temperatura
β_h	função que depende da umidade

Para o terceiro fator:

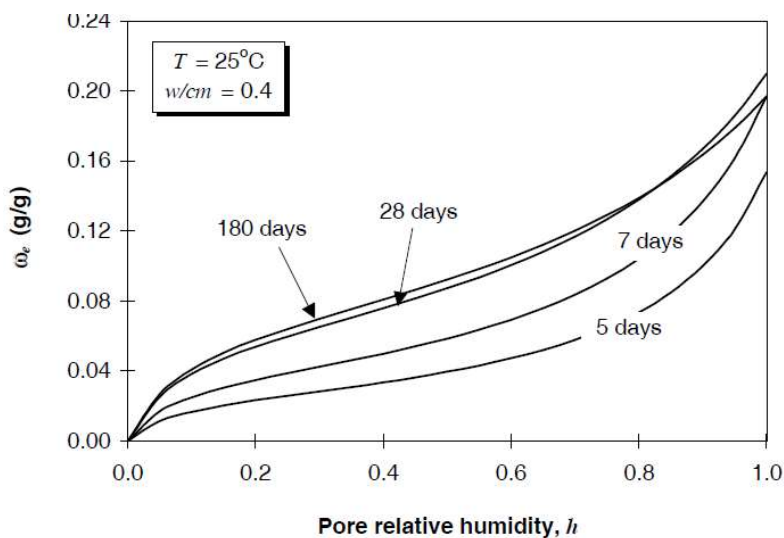
$$F_3(h) = \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1 - h}{1 - h_c} \right)^n} \quad (3.35)$$

Onde:

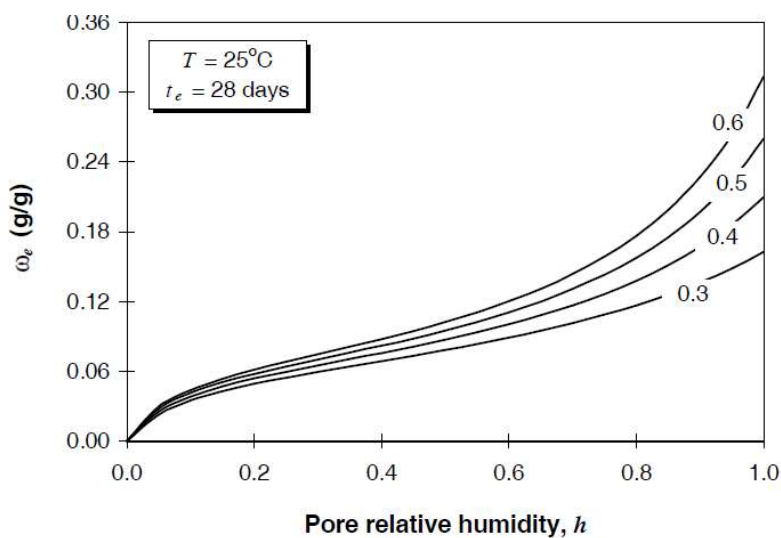
α_0	parâmetro que representa a relação $D_{h,min}/D_{h,max}$
h_c	umidade com que D_h está entre seu máximo e mínimo [%]
n	Parâmetro que caracteriza a “propagação da gota”

Como visto, a difusão de umidade é não linear e são utilizadas as isotermas de sorção e dessorção para relacionar a umidade relativa e o teor de água evaporável.

Martín-Pérez (1999) utilizou o modelo de Brunauer-Skalny-Bodor (BRUNAUER et al., 1960). É assumido que esse modelo é válido para sorção e dessorção. A Figura 3.4 mostra as isotermas quando se mantém a relação a/c e varia o tempo de exposição. A Figura 3.5 mostra as isotermas na situação contrária, quando se mantém o tempo de exposição e varia a relação a/c.

Figura 3.4: Isoterma de sorção – Influência do tempo de exposição

Fonte: Martín-Pèrez (1999, p. 72)

Figura 3.5: Isoterma de sorção – Influência da relação a/c

Fonte: Martín-Pèrez (1999, p. 72)

3.2.2.4 Condições de contorno

As condições de contorno para o fluxo de umidade, a transferência de calor e o fluxo de cloretos entre a superfície e o ambiente são as mesmas que Saetta et al. (1999) propuseram (Equações 3.19, 3.20 e 3.21).

3.2.2.5 Considerações sobre o Modelo de Martín-Pérez (1999)

Após análise dos resultados, Martín-Pérez (1999) afirmou que a convecção não foi bem descrita através de seu modelo, pois ele simula adequadamente a fase de secagem, mas não a de molhagem. Por essa razão, procurou-se estudar um modelo que simulasse as fases de secagem e molhagem adequadamente. Lin et al. (2010) obtiveram bons resultados e seu modelo será analisado a seguir.

Além disso, com relação às isotermas de ligação, Martín-Pérez (1999) aplicou em suas simulações a isoterma de linear e a de Freundlich. Ela observou que os perfis de cloretos que consideraram a isoterma linear foram mais realistas que os perfis calculados com a isoterma de Freundlich.

Aqui é importante observar também que Meijers (2003) aplicou a isoterma linear e a de Langmuir. Ele afirmou que a isoterma de Langmuir levou a resultados que não correspondiam bem aos dados experimentais, ao contrário dos resultados obtidos com a isoterma linear.

Pelo que foi descrito acima, já vale afirmar que no modelo desse trabalho somente será utilizada a isoterma linear.

3.2.3. Modelo de Lin et al. (2010)

3.2.3.1. Coeficiente de difusão de cloretos

O coeficiente de difusão de cloretos é calculado com $f_1(T)$ e $f_2(t_e)$ da mesma forma de Martín-Pérez (1999), porém, o fator de umidade é calculado da seguinte forma:

$$f_3(h) = h^\eta \quad (3.36)$$

Onde:

h umidade relativa [%]
 η índice de potência

Há também um fator a mais: $f_4(d)$ que leva em conta a decadência da performance estrutural do concreto. Todavia, como a análise estrutural do concreto não faz parte do escopo desse trabalho, esse fator não será apresentado no estudo do modelo.

3.2.3.2. Difusão e convecção de cloretos

O transporte de cloretos no concreto é dado por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{tc}}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(s D_c \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(s D_c \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(s C_{fc} D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(s C_{fc} D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.37)$$

Onde:

C_{tc}	concentração total de cloretos [kg/m^3 de concreto]
s	porosidade do concreto, assumida como constante
D_c	coeficiente de difusão intrínseco [m^2/s]
C_{fc}	concentração de cloretos livres [kg/m^3 de concreto]
D_h	coeficiente de difusão de umidade [m^2/s]
h	umidade relativa [%]

Lin et al. (2010) afirma que as concentrações de cloretos totais, ligados e livres no concreto se relacionam da seguinte forma:

$$C_{tc} = C_{bc} + shC_{fc} \quad (3.38)$$

Considerando a isoterma linear, tem-se a seguinte relação:

$$C_{tc} = (\alpha + sh)C_{fc} \quad (3.39)$$

Pode-se escrever a Equação 3.36 em termos da concentração de cloretos livres:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{fc} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C_{fc} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.40)$$

Onde:

$$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{sh} \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}} \quad (3.41)$$

$$D_h^* = \frac{D_h}{1 + \frac{1}{sh} \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}} \quad (3.42)$$

3.2.3.3. Acoplamento com difusão de calor e de umidade

A equação para transferência de calor é a mesma utilizada por Saetta et al. (1993) e Martín-Pérez (1999), no domínio bidimensional (Equação 3.15).

Para o fluxo de umidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (3.43)$$

Quando um concreto parcialmente saturado está sendo molhado, a água é rapidamente absorvida através da sucção capilar. Durante os períodos secos, a umidade é expulsa do concreto interno por evaporação da água dos poros, um processo mais lento. Então devem existir dois coeficientes de difusão de umidade.

Coeficiente de difusão de umidade durante a secagem:

$$D_h = D_d(h) = D_d^s \left[\alpha_0 + \frac{(1 - \alpha_0)}{1 + \left(\frac{1 - h}{1 - h_c} \right)^N} \right] \cdot F_1(T) \cdot F_2(t_e) \quad (3.44)$$

Coeficiente de difusão de umidade durante a molhagem:

$$D_h = D_w(h) = D_w^0 \cdot e^{n \left(\frac{h - h_0}{h_1 - h_0} \right)} \cdot F_1(T) \cdot F_2(t_e) \quad (3.45)$$

$f_1(T)$ tem a mesma equação de Saetta et al. (1993) (Equação 3.10), lembrando que, assim como em U nesse caso é a energia de ativação do processo de difusão de umidade, e para $f_2(t_e)$ são válidas as Equações 3.31 a 3.35 de Martín-Pérez (1999).

3.2.3.3. Condições de contorno

As condições de contorno para o fluxo de umidade e a transferência de calor são as mesmas de Saetta et al. (1999) propuseram (Equações 3.19, 3.20 e 3.21).

Para o transporte de cloretos, Lin et al. (2010) propõe a seguinte condição de contorno:

$$J_c^s = sB_c(C_{en} - C_{fc}) + sC_{en}B_h(h_{en} - h) \quad (3.46)$$

3.2.3.4. Considerações sobre o modelo de Lin et al. (2010)

Nas conclusões, Lin et al. (2010) afirma que nos ciclos de molhagem-secagem, os perfis de cloreto previstos pelo seu modelo numérico diferem substancialmente do previsto pelos tradicionais modelos, afirmando a necessidade de se avaliar coeficientes diferentes de umidade para a molhagem e a secagem.

Outra questão interessante no modelo de Lin et al. (2010) é a utilização da porosidade s no cálculo de cloretos, considerada constante. Pode-se fazer uma comparação com as fórmulas de Martín-Pérez (1999) e perceber que o teor de água evaporável (w_e) de Martín-Pérez (1999) é a porosidade multiplicada pela umidade (sh) de Lin et al. (2010).

Dessa forma, Lin et al. (2010) não utiliza em seus cálculos as isotermas de sorção e dessorção utilizadas por Saetta et al. (1993) (Equações 3.17 e 3.18) e Martín-Pérez (1999) (Figura 3.5 e 3.5), tornando o cálculo do fluxo de umidade mais simples.

Em contrapartida, Lin et al. (2010) atribui o quarto fator multiplicativo $f_4(d)$ que leva em conta a decadência da performance estrutural do concreto.

3.2.4. Modelo de Dominicini (2016)

Dominicini (2016) propôs um modelo baseado em Martín-Pérez (1999) e em Tavares (2013). O modelo descreve apenas a difusão (concreto saturado), e as equações de temperatura e de umidade não estão acopladas.

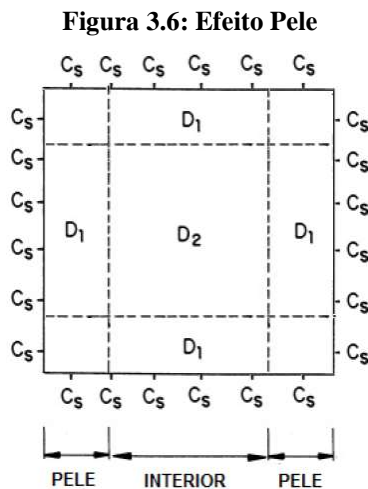
Para os fatores multiplicadores do coeficiente de difusão, a temperatura e a umidade no concreto foram consideradas homogêneas e iguais às do ambiente circundante, ou seja, variando senoidalmente ao longo de 1 ano. Apesar da simplificação, os resultados obtidos para o coeficiente de difusão de cloretos foram satisfatórios.

Dois efeitos interessantes foram aplicados nesse modelo: o efeito pele e o efeito da radiação solar. O efeito pele já havia sido aplicado por Tavares (2013), mas o efeito da radiação solar foi aplicado pela primeira vez.

3.2.4.1. Efeito Pele

A pele de concreto é a zona mais próxima à superfície do cobrimento. Ela geralmente possui composição diferente daquela das camadas mais internas, devido a fenômenos como o contato com as formas, carbonatação, precipitação de brucita, segregação dos agregados e até mesmo quando o concreto apresenta algum revestimento ou pintura (ANDRADE et al., 1997).

Andrade et al. (1997) modela o efeito pele considerando valores diferentes para a difusão da camada superficial e do interior, sendo que a concentração de cloretos no limite entre a pele e o interior passa a ser a concentração superficial do concreto (Figura 3.6).



Fonte: Adaptada de Andrade et al. (1997)

A existência de uma camada superficial com uma difusividade diferente irá causar uma alteração nos perfis de concentração de cloretos. Valores de difusividade da pele superiores podem ocorrer quando a pele está carbonatada ou quando os cloretos penetram por convecção. O caso oposto, com difusividade maior no interior, ocorre quando há algum efeito barreira na superfície, como precipitação de brucita ou utilização de pintura de revestimento (ANDRADE et al., 1997).

3.2.4.2 Radiação Solar

Dominicini (2016) apresentou pela primeira vez um modelo considerando a influência da radiação solar.

A radiação emitida pelo Sol e incidente na atmosfera terrestre causa um aumento na temperatura ambiente representado por ΔT calculado da seguinte forma:

$$\Delta T = \vartheta \frac{I_d}{24 \cdot coef} \quad (3.47)$$

Onde:

- ΔT aumento da temperatura exterior [°C]
- ϑ fator de absorção da energia recebida (0,50 a 0,70)
- I_d radiação solar total diária [$MJ/m^2 dia$]

coef coeficiente de transmissão no contato ar-concreto $\left[\frac{MJ}{m^2h} ^\circ C\right]$

Para saber a radiação solar total diária, alguns fatores precisam ser calculados. Dominicini (2016) apresenta a formulação completa para obtenção de I_d .

3.3. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DETERMINÍSTICOS COM SOLUÇÃO NUMÉRICA

Para facilitar o entendimento dos modelos com solução numérica apresentados anteriormente, o Quadro 3.2 mostra resumidamente as principais equações e as diferenças entre os modelos.

Quadro 3.2: Principais equações dos modelos determinísticos com solução analítica (continua)

Principais equações dos modelos determinísticos com solução analítica (1) Saetta et al. (1993)^a; (2) Martín-Pérez (1999); (3) Lin et al. (2010); (4) Dominicini (2016)	
Transferência de calor:	
$(1, 2, 3) \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \lambda \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)$	
Fluxo de umidade:	
$(1, 3) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (2) \frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right)$	
Coefficiente de difusão de umidade:	
$(1, 2) D_h = D_{h,ref} \cdot F_1(T) \cdot F_2(t_e) \cdot F_3(h);$	
$(3) D_h = D_d(h) = D_d^s \left[\alpha_0 + \frac{(1-\alpha_0)}{1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c} \right)^n} \right] \cdot F_1(T) \cdot F_2(t_e) \cdot F_3(d) \text{ OU}$	
$D_h = D_w(h) = D_w^0 \cdot e^{n \left(\frac{h-h_0}{h_1-h_0} \right)} \cdot F_1(T) \cdot F_2(t_e) \cdot F_3(d)$	
$(1, 2, 3) F_1(T) = e^{\left[\frac{U_h}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]}$	
$(1, 2, 3) F_2(t_e) = 0,3 + \sqrt{\frac{13}{t_e}}; t_e = t_0 + \int_{t_0}^t \beta_T \beta_h dt;$	
$\beta_T = e^{\left[\frac{U_h}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]}; \beta_h = \frac{1}{1 + (7,5 - 7,5h^4)}; \frac{U_h}{R} = 4600 \left[\frac{30}{(T - 263)} \right]^{0,39}$	
$F_3(h) = \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c} \right)^n}$	

^a Saetta et al. (1993) apresenta sua solução apenas no domínio unidimensional, portanto, as componentes em y das equações são ignoradas para esse modelo.

Fonte: Elaborada pela autora.

Quadro 3.2: Principais equações dos modelos determinísticos com solução analítica (conclusão)

Principais equações dos modelos determinísticos com solução analítica	
(1) Sietta et al. (1993); (2) Martín-Pérez (1999); (3) Lin et al. (2010); (4) Dominicini (2016)	
Transporte de cloretos	
Somente difusão:	$(4) \frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c \frac{\partial C_t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c \frac{\partial C_t}{\partial y} \right)$
Difusão e convecção:	$(1) \frac{\partial C_t}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_t}{\partial x} \right) + \frac{C_t}{\delta} \cdot \frac{\partial w}{\partial t}$ $(2) \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{fc} w_e D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(C_{fc} w_e D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right)$ $(3) \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{fc} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C_{fc} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} \right)$
Coefficiente de difusão de cloretos:	
(1, 2, 4) $D_c = D_{c,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t_e) \cdot f_3(h)$ (3) $D_c = D_{c,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t_e) \cdot f_3(h) \cdot f_4(d)$	
(1, 2, 3, 4) $f_1(T) = e^{\left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]}$	
(1) $f_2(t_e) = \zeta + (1 - \zeta) \cdot \left(\frac{28}{t_e} \right)^{1/2}$ (2, 3, 4) $f_2(t_e) = \left(\frac{t_{ref}}{t_e} \right)^m$	
(1, 2, 4) $f_3(h) = \left[1 + \frac{(1 - h)^4}{(1 - h_c)^4} \right]^{-1}$ (3) $f_3(h) = h^\eta$	
$(1) D_c^* = \frac{D_c}{\delta} \quad (2) D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}}; \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} = \alpha \beta C_{fc}^{\beta-1} OU \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} = \alpha$ $(3) D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{sh} \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}}; \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}} = \alpha \beta C_{fc}^{\beta-1} \quad (4) D_c^* = D_c$	

Fonte: Elaborado pela autora.

Capítulo 4:

MODELO E MÉTODOS

4. MODELO E MÉTODOS

A partir dos modelos apresentados no Capítulo 3 foi possível definir as equações que serão utilizadas no modelo que é desenvolvido neste trabalho.

Para esse modelo, são utilizadas 3 equações diferenciais parciais que descrevem a entrada de cloreto no concreto: a transferência de calor, o fluxo de umidade e o transporte de cloretos. A solução analítica deste sistema não é possível pela existência de equações não-lineares. No entanto, este conjunto de equações pode ser resolvido numericamente utilizando o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas.

4.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é um método numérico robusto e aplicável a domínios elaborados. A ideia central do MEF é discretizar o domínio, representando-o, ainda que de forma aproximada, por uma reunião de um número finito de elementos, e resolver não o problema original, mas sim um que lhe é associado, sua forma fraca.

No MEF podem ser empregadas duas formulações: a formulação pelo método dos resíduos ponderados e a formulação por variacional. As duas convergem para a mesma formulação mas apesar da simplicidade do método dos resíduos ponderados, a formulação variacional permite uma visão mais ampla do problema físico.

Nesse trabalho será utilizado o método do resíduos ponderados.

4.1.1. Método dos Resíduos Ponderados

Seja a equação diferencial com condições de contorno homogêneas:

$$L\{\tau\} = f \quad (4.1)$$

Onde L é um operador diferencial linear e τ é uma função hipotética. O resíduo r é definido como:

$$r = L\{\tilde{\tau}\} - f \quad (4.2)$$

$\tilde{\tau}$ é uma função de aproximação de τ . Se forem tomadas as funções de peso (ou funções de ponderação), w , o método dos pesos residuais ou método de Galerkin é descrito da seguinte forma:

Encontrar uma função $\tilde{\tau}$ tal que:

$$\langle r, w \rangle = \langle L\{\tilde{\tau}\}, w \rangle - \langle f, w \rangle = 0 \quad (4.3)$$

Onde $\langle r, w \rangle$ é o produto interno e é definido como:

$$\langle r, w \rangle = \int_{\Omega} r w^* d\Omega \quad (4.4)$$

w^* é o complexo conjugado de w .

A Equação 4.3 pode ser reescrita como:

$$\langle L\{\tilde{\tau}\}, w \rangle = \langle f, w \rangle \quad (4.5)$$

A função de aproximação pode ser apresentada na forma de um somatório de coeficientes multiplicados por funções de base conhecidas N_j :

$$\tilde{\tau} = \sum_{j=1}^n B_j N_j = \{B\}^t \{N\} \quad (4.6)$$

Onde:

- B_j coeficientes a serem determinados
- $\{B\}$ vetor com os valores de B_j
- $\{N\}$ vetor com as funções de base N_j

Os coeficientes a serem determinados dessa forma zeram o resíduo ponderado pela função peso.

As funções de base N_j são definidas em todo o domínio onde está definido τ .

As funções peso são as mesmas funções de base de aproximação N_i . Assim:

$$\langle r, N_i \rangle = 0 \quad (4.7)$$

As funções N_i formam um sistema de n equações necessárias para a determinação dos parâmetros B_j .

Para as funções de base adota-se:

$$N \text{ é contínua; } \partial N / \partial x \text{ não é contínua; } \partial^2 N / \partial x^2 \text{ não existe}$$

A função N_i é definida como:

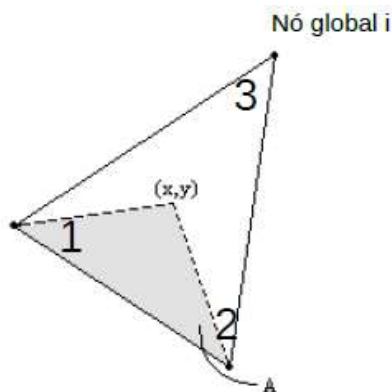
$$N_i = \frac{A}{S} \quad (4.8)$$

Onde:

- A área parcial do elemento (Figura 4.1)
 S área do elemento (Figura 4.1)

No elemento de análise, o triângulo, há uma numeração dos nós locais (1 a 3 para o caso linear e 1 a 6 para o caso quadrático para todos os triângulos) e uma numeração global, que vai de 1 ao número de nós totais do domínio.

Figura 4.1: Áreas para definição de N_i



Fonte: Elaborada pela autora.

Os nós globais se relacionam com os nós locais através da matriz topologia. Dessa forma, as equações são calculadas para um elemento genérico, e a partir da matriz topologia, todos os elementos do domínio são envolvidos no cálculo, solucionando o problema real.

4.1.2. Elementos finitos triangulares em 2D

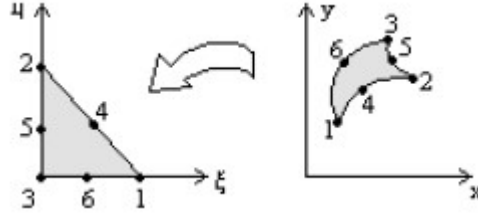
Neste trabalho serão utilizados elementos triangulares para discretizar a estrutura ou domínio de interesse.

O programa desenvolvido admite elemento triangular linear (primeira ordem) ou quadrático (segunda ordem), no entanto o mapeamento é realizado sempre de forma quadrática, por integração numérica. Ou seja, para os elementos de primeira ordem, o programa admite super parametrização, para os elementos de segunda ordem, o programa é isoparamétrico. Isso é interessante pois o triângulo pode ter lado curvo mesmo que a ordem da função de aproximação seja linear.

4.1.2.1. Integração numérica

Seja o elemento da Figura 4.2:

Figura 4.2: Transformação de coordenadas para integração em triângulo mestre no plano $\xi - \eta$



Fonte: Elaborada pela autora.

As funções de área no plano $\xi - \eta$ são definidas:

$$L_1(\xi, \eta) = \xi; \quad L_2(\xi, \eta) = \eta; \quad L_3(\xi, \eta) = 1 - \xi - \eta \quad (4.9)$$

Para o caso quadrático, as funções de base são:

$$\begin{aligned} N_1 &= L_1(2L_1 - 1); & N_2 &= L_2(2L_2 - 1); & N_3 &= L_3(2L_3 - 1) \\ N_4 &= 4L_1L_2; & N_5 &= 4L_2L_3; & N_6 &= 4L_1L_3 \end{aligned} \quad (4.10)$$

A transformação de coordenadas é definida como:

$$x(\xi, \eta) = \sum_{k=1}^6 x_k N_k(\xi, \eta); \quad y(\xi, \eta) = \sum_{k=1}^6 y_k N_k(\xi, \eta) \quad (4.11)$$

O vetor posição de uma curva qualquer no plano $x - y$ é dado por:

$$\vec{r} = x(\xi, \eta)\hat{i} + y(\xi, \eta)\hat{j} \quad (4.12)$$

A diferenciação do mesmo é tangente a curva no ponto:

$$\overrightarrow{dr} = dx \hat{i} + dy \hat{j} \quad (4.13)$$

Sendo que:

$$dx = \frac{\partial x}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial x}{\partial \eta} d\eta; \quad dy = \frac{\partial y}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial y}{\partial \eta} d\eta \quad (4.14)$$

Para a curva η constante, $d\eta$ é zero, e para a curva ξ constante, $d\xi$ é zero, então:

$$\overrightarrow{dr_1} = \left\{ \frac{\partial x}{\partial \xi} \hat{i} + \frac{\partial y}{\partial \xi} \hat{j} \right\} d\xi; \quad \overrightarrow{dr_2} = \left\{ \frac{\partial x}{\partial \eta} \hat{i} + \frac{\partial y}{\partial \eta} \hat{j} \right\} d\eta \quad (4.15)$$

O elemento de área pode ser escrito como:

$$dxdy = |\overrightarrow{dr_1} \times \overrightarrow{dr_2}| = \left| \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} \right| d\xi d\eta = |J| d\xi d\eta \quad (4.16)$$

Sendo f uma função de x e y , as derivadas de f em relação a ξ e η são:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \xi} &= \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi}; & \left[\frac{\partial f}{\partial \xi} \right] &= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \end{bmatrix} \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] \rightarrow \left[\frac{\partial f}{\partial \xi} \right] = |J| \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] \\ \frac{\partial f}{\partial \eta} &= \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} & \left[\frac{\partial f}{\partial \eta} \right] &= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] \rightarrow \left[\frac{\partial f}{\partial \eta} \right] = |J| \left[\frac{\partial f}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] = \frac{1}{\frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta}} \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial \eta} & -\frac{\partial y}{\partial \xi} \end{bmatrix} \left[\frac{\partial f}{\partial \xi} \right] \rightarrow \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right] = \frac{1}{|J|} \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial \eta} & -\frac{\partial y}{\partial \xi} \end{bmatrix} \left[\frac{\partial f}{\partial \xi} \right] \quad (4.18)$$

Logo, integrais no plano $x - y$ podem ser transformadas para o plano $\xi - \eta$:

$$\iint f(x, y) \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} dx dy \rightarrow \int_0^1 \int_0^{1-\xi} f(\xi, \eta) \frac{1}{|J|} \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial g}{\partial \xi} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial g}{\partial \eta} \right) |J| d\eta d\xi \quad (4.19)$$

Para fazer a integração numérica no triângulo mestre, utiliza-se a quadratura de Gauss em n pontos:

$$\int_0^1 \int_0^{1-\xi} \psi(\xi, \eta) d\eta d\xi = \sum_{i=1}^n N_i \psi(\xi_i, \eta_i) \quad (4.20)$$

Onde N_i são pesos conforme a Tabela 4.1 e ξ_i e η_i são os valores das coordenadas de área, todos especificados em n pontos (Figura 4.3).

$$x(\xi, \eta) = \xi(x_1 - x_3) + \eta(x_2 - x_3) + x_3 \quad (4.23)$$

Como pode-se perceber, as derivadas de x e y em relação a ξ e η são constantes:

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = x_1 - x_3; \quad \frac{\partial x}{\partial \eta} = x_2 - x_3; \quad \frac{\partial y}{\partial \xi} = y_1 - y_3; \quad \frac{\partial y}{\partial \eta} = y_2 - y_3; \quad (4.24)$$

Assim, o jacobiano possui o módulo também constante:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} e |J| = \left| \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} \right| \quad (4.25)$$

Os coeficientes da matriz K são (ver a origem das matrizes nas seções 4.3 a 4.5 a seguir):

$$K_{ij} = \int_{\Delta} \nabla N_i \cdot \nabla N_j \, dx \, dy = \int_{\Delta} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx \, dy \quad (4.26)$$

Fazendo a mudança de variáveis podemos reescrever K na forma:

$$K_{ij} = \int_{\Delta} \left\{ \left(J_{22} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} - J_{12} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) \left(J_{22} \frac{\partial N_j}{\partial \xi} - J_{12} \frac{\partial N_j}{\partial \eta} \right) + \left(J_{11} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} - J_{21} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \right) \left(J_{11} \frac{\partial N_j}{\partial \eta} - J_{21} \frac{\partial N_j}{\partial \xi} \right) \right\} \frac{d\xi \, d\eta}{|J|^2} \quad (4.27)$$

4.1.2.3. Matriz elementar para 2D quadrática

Este método é basicamente o mesmo que para o 2D linear, porém o Jacobiano agora depende de ξ e η .

4.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A transferência de calor é dada por:

$$\rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (4.28)$$

Onde:

- ρ_c massa específica do concreto [kg/m^3] (assumido constante)
- c_c calor específico do concreto [$J/(kg \cdot ^\circ C)$] (assumido constante)
- λ condutividade térmica [$W/(m \cdot ^\circ C)$] (assumido constante)

Empregando o método de Galerkin:

$$\rho_c c_c \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} w T d\Omega - \lambda \int_{\Omega} w \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) d\Omega = 0 \quad (4.29)$$

Onde:

w função de ponderação
 Ω domínio do problema

As derivadas parciais de segunda ordem podem ser substituídas por derivadas parciais de primeira ordem aplicando o Teorema de Green, isto é:

$$\int_{\Omega} w \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) d\Omega = \oint_l w \frac{\partial T}{\partial n} dl - \int_{\Omega} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) d\Omega \quad (4.30)$$

Aplicando a Equação 4.30 em 4.29:

$$\rho_c c_c \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} w T d\Omega + \lambda \int_{\Omega} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) d\Omega - \lambda \oint_l w \frac{\partial T}{\partial n} dl = 0 \quad (4.31)$$

Sabendo as condições de contorno, os fluxos através do limite são especificados e a integral no limite se torna:

$$\lambda \oint_l w \frac{\partial T}{\partial n} dl = \oint_l w B_T (T_{en} - T) dl \quad (4.32)$$

Onde:

B_T coeficiente de transferência de calor na superfície [$W/(m^2 \text{°C})$]
 T_{en} temperatura ambiente [K]

A temperatura ambiente é considerada como uma senóide que varia anualmente em função do dia do ano como:

$$T_{en} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \sin \left[\pi \left(\frac{182,5 - 2 dia_{T_{max}}}{365} \right) + 2\pi \frac{dia}{365} \right] \quad (4.33)$$

Onde:

T_{max} temperatura máxima anual [K]
 T_{min} temperatura mínima anual [K]
 $dia_{T_{max}}$ dia em que ocorre a temperatura máxima anual

Substituindo a Equação 4.32 na Equação 4.31:

$$\begin{aligned} \rho_c c_c \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} w T d\Omega + \lambda \int_{\Omega} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) d\Omega + \oint_l w B_T T \\ = \oint_l w B_T T_{en} \end{aligned} \quad (4.34)$$

A Equação 4.34 pode ser discretizada e escrita na forma de funções de base, onde:

$$w = N_i \quad e \quad T = \sum_{j=1}^n T_j N_j$$

Então:

$$\begin{aligned} \rho_c c_c \sum_{j=1}^n \frac{\partial T_j}{\partial t} \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega + \lambda \sum_{j=1}^n T_j \int_{\Omega} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega \\ + B_T \sum_{j=1}^n T_j \oint_l N_i N_j dl = + B_T \oint_l T_{en} N_i dl \end{aligned} \quad (4.35)$$

A Equação 4.35 pode ser escrita na forma matricial:

$$\rho_c c_c [MT] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + \lambda [KT] \{T\} + B_T [ST] \{T\} = B_T T_{en} \{FT\} \quad (4.36)$$

Onde:

$$\begin{aligned} [MT] &= MT_{ij} = \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega \\ [KT] &= KT_{ij} = \int_{\Omega} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega \\ [ST] &= ST_{ij} = \oint_l N_i N_j dl \\ \{FT\} &= FT_i = \oint_l N_i dl \end{aligned}$$

Reescrevendo a Equação 4.36 em uma forma simplificada:

$$[MT^*] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + [KT^*] \{T\} = B_T T_{en} \{FT\} \quad (4.37)$$

Onde:

$$\begin{aligned} [MT^*] &= \rho_c c_c [MT] \\ [KT^*] &= \lambda [KT] + B_T [ST] \end{aligned}$$

A Equação 4.37 representa um sistema de equações diferenciais de primeira ordem no domínio do tempo. Para obter uma solução numérica, esta equação é integrada no tempo por meio de uma aproximação por diferenças finitas.

4.2.1. Passo no tempo pelo Método das Diferenças Finitas

O vetor temperatura em função do tempo pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{\partial \{T\}}{\partial t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (4.38)$$

O vetor temperatura pode ser aproximado por:

$$\{T\} \cong \{T\}^{t+\Delta t/2} \cong \theta \{T\}^{t+\Delta t} + (1 - \theta) \{T\}^t \quad (4.39)$$

Onde:

θ parâmetro que varia de 0 a 1
 Δt incremento de tempo

Reescrevendo a Equação 4.37 em termos de 4.38 e 4.39:

$$\begin{aligned} [MT^*] \left(\frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \right) + \theta [KT^*] \{T\}^{t+\Delta t} + (1 - \theta) [KT^*] \{T\}^t \\ = B_T T_{en} \{FT\} \end{aligned} \quad (4.40)$$

Rearranjando os termos:

$$\begin{aligned} ([MT^*] + \theta \Delta t [KT^*]) \{T\}^{t+\Delta t} \\ = ((\theta - 1) \Delta t [KT^*] + [MT^*]) \{T\}^t + B_T T_{en} \Delta t \{FT\} \end{aligned} \quad (4.41)$$

4.3. FLUXO DE UMIDADE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O fluxo de umidade é dado por:

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (4.42)$$

Onde:

D_h coeficiente de difusão de umidade [m^2/s]

Para o cálculo do coeficiente de difusão de umidade serão utilizadas as Equações 4.43 a 4.50:

$$D_h = D_{h,ref} \cdot F_1(T) \cdot F_2(t_e) \cdot F_3(h) \quad (4.43)$$

$$F_1(T) = e^{\left[\frac{U_h}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (4.44)$$

$$F_2(t_e) = 0,3 + \sqrt{\frac{13}{t_e}} \quad (4.45)$$

$$t_e = t_0 + \int_{t_0}^t \beta_T \beta_h dt \quad (4.46)$$

$$\beta_T = e^{\left[\frac{U_h}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (4.47)$$

$$\beta_h = \frac{1}{1 + (7,5 - 7,5h^4)} \quad (4.48)$$

$$\frac{U_h}{R} = 4600 \left[\frac{30}{(T - 263)} \right]^{0,39} \quad (4.49)$$

$$F_3(h) = \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1 - h}{1 - h_c}\right)^n} \quad (4.50)$$

Onde:

- $D_{h,ref}$ coeficiente de difusão de umidade de referência [m^2/s]
- U_h energia de ativação do processo de difusão de umidade [kJ/mol]
- R constante dos gases ($8,314 \times 10^{-3} kJ/(K \cdot mol)$)
- T_{ref} temperatura de referência ($296K$)
- t_e tempo de exposição [s]
- t_0 tempo de exposição inicial [s]
- α_0 parâmetro que representa a relação $D_{h,min}/D_{h,máx}$
- h_c umidade com que D_h está entre seu máximo e mínimo
- n parâmetro que caracteriza a “propagação da gota”

A Equação 4.42 tem o mesmo formato da Equação 4.28, com a mesma equação para as condições de contorno, então a resolução é feita da mesma maneira. A Equação 4.42 escrita na forma matricial é:

$$[MH] \frac{\partial \{h\}}{\partial t} + [KH] \{h\} + B_h [SH] \{h\} = B_h h_{en} \{FH\} \quad (4.51)$$

Onde:

$$[MH] = MH_{ij} = \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega$$

$$[KH] = KH_{ij} = \int_{\Omega} D_h \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega$$

$$[SH] = SH_{ij} = \oint_l N_i N_j dl$$

$$\{FH\} = FH_i = \oint_l N_i dl$$

B_h coeficiente de transferência de umidade na superfície [$1/(m^2 \cdot s)$]
 h_{en} umidade ambiente

A umidade ambiente é considerada como uma senóide que varia anualmente em função do dia do ano como:

$$h_{en} = \frac{h_{max} + h_{min}}{2} + \frac{h_{max} - h_{min}}{2} \sin \left[\pi \left(\frac{182,5 - 2dia_{h_{max}}}{365} \right) + 2\pi \frac{dia}{365} \right] \quad (4.52)$$

Onde:

$h_{máx}$ umidade máxima anual
 $h_{mín}$ umidade mínima anual
 $dia_{h_{max}}$ dia em que ocorre a umidade máxima anual

Reescrevendo a Equação 4.51 em uma forma simplificada:

$$[MH] \frac{\partial \{h\}}{\partial t} + [KH^*] \{h\} = B_h h_{en} \{FH\} \quad (4.53)$$

Onde:

$$[KH^*] = [KH] + B_h [SH]$$

4.3.1. Passo no tempo pelo Método das Diferenças Finitas

Utilizando o Método das Diferenças Finitas para obter uma solução numérica para a Equação 4.53:

$$\begin{aligned} ([MH] + \theta \Delta t [KH^*]) \{h\}^{t+\Delta t} \\ = ((\theta - 1) \Delta t [KH^*] + [MH]) \{h\}^t + B_h h_{en} \Delta t \{FH\} \end{aligned} \quad (4.54)$$

4.4. TRANSPORTE DE CLORETOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A variação da concentração de cloretos livres no tempo é dado por:

$$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{fc} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(C_{fc} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (4.55)$$

Onde:

C_{fc} concentração de cloretos livres
 D_c^* coeficiente de difusão de cloretos aparente
 D_h^* coeficiente de difusão de umidade aparente

Quando se considera a isoterma como linear, o coeficiente de difusão de cloretos aparente e o coeficiente de difusão de umidade aparente podem ser calculados por:

$$D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{\alpha}{sh}} \quad (4.56)$$

$$D_h^* = \frac{D_h}{1 + \frac{\alpha}{sh}} \quad (4.57)$$

Onde:

- α inclinação da linha
- s porosidade do concreto (assumida como constante)

Para o cálculo do coeficiente de difusão de de cloretos serão utilizadas as Equações 4.58 a 4.61:

$$D_c = D_{c,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t_e) \cdot f_3(h) \quad (4.58)$$

$$f_1(T) = e^{\left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (4.59)$$

$$f_2(t_e) = \left(\frac{t_{ref}}{t_e} \right)^m \quad (4.60)$$

$$f_3(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4} \right]^{-1} \quad (4.61)$$

Onde:

- $D_{c,ref}$ coeficiente de difusão de cloretos de referência [m^2/s]
- U energia de ativação do processo de difusão de cloretos [kJ/mol]
- t_{ref} tempo de exposição em que $D_{c,ref}$ foi medido [s]
- m fator de redução de idade

Usando uma identidade vetorial é possível decompor o termo convectivo da Equação 4.55:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\phi \nabla A) &= \nabla \phi \cdot \nabla A + \phi \nabla^2 A \\ \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) - \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} \\ &\quad - C_{fc} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} \right) - C_{fc} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.62)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) - \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} \\ - C_{fc} \left(1 + \frac{\alpha}{sh} \right) \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (4.63)$$

Empregando o método do resíduo ponderado:

$$\int_{\Omega} w \left[\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) - \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} + C_{fc} \left(1 + \frac{\alpha}{sh} \right) \frac{\partial h}{\partial t} \right] d\Omega = 0 \quad (4.64)$$

Onde:

w função de ponderação
 Ω domínio do problema

Aplicando o Teorema de Green:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} w C_{fc} d\Omega + \int_{\Omega} \left(\frac{\partial w}{\partial x} D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) d\Omega \\ & - \int_{\Omega} w \left(\frac{\partial C_{fc}}{\partial x} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} \right) d\Omega \\ & - \int_{\Omega} w C_{fc} \left(1 + \frac{\alpha}{sh} \right) \frac{\partial h}{\partial t} d\Omega - \oint_l w D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial n} dl = 0 \end{aligned} \quad (4.65)$$

Sabendo as condições de contorno, os fluxos através do limite são especificados e a integral no limite se torna:

$$\oint_l w D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial n} dl = \oint_l w [B_c (C_{en} - C_{fc}) + C_{en} B_h (h_{en} - h)] dl \quad (4.66)$$

Substituindo a Equação 4.66 na Equação 4.65 e rearranjando os termos:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} w C_{fc} d\Omega + \int_{\Omega} \left(\frac{\partial w}{\partial x} D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) d\Omega \\ & - \int_{\Omega} w \left(\frac{\partial C_{fc}}{\partial x} D_h^* \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} D_h^* \frac{\partial h}{\partial y} \right) d\Omega \\ & - \int_{\Omega} w C_{fc} \left(1 + \frac{\alpha}{sh} \right) \frac{\partial h}{\partial t} d\Omega + \oint_l w B_c C_{fc} dl \\ & = \oint_l w C_{en} \{ B_c + B_h (h_{en} - h) \} dl \end{aligned} \quad (4.67)$$

A Equação 4.67 pode ser discretizada e escrita na forma de funções de base, onde:

$$w = N_i \quad , \quad C_{fc} = \sum_{j=1}^n C_{fcj} N_j \quad \text{e} \quad h = h_l N_l$$

Então:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \frac{\partial C_{fcj}}{\partial t} \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega + \sum_{j=1}^n C_{fcj} \\ & - \sum_{j=1}^n C_{fcj} \int_{\Omega} D_h^* N_i \left(\frac{\partial N_j}{\partial x} h_l N_l + \frac{\partial N_j}{\partial y} h_l N_l \right) d\Omega \\ & - \sum_{j=1}^n C_{fcj} \int_{\Omega} N_i \left(1 + \frac{\alpha}{sh} \right) \frac{\partial h_l}{\partial t} N_l d\Omega \\ & + \sum_{j=1}^n C_{fcj} \oint_l B_c N_i N_j dl = \oint_l N_i C_{en} \{ B_c + B_h (h_{en} - h) \} dl \end{aligned} \quad (4.68)$$

A Equação 4.68 pode ser escrita na forma matricial:

$$\begin{aligned} [MC] \frac{\partial \{C_{fc}\}}{\partial t} + [KC] \{C_{fc}\} - [GC] \{C_{fc}\} - [RC] \{C_{fc}\} + B_c [SC] \{C_{fc}\} \\ = (B_c + B_h (h_{en} - h)) \Delta t \{FC\} \end{aligned} \quad (4.69)$$

Onde:

$$\begin{aligned} [MT] &= MT_{ij} = \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega \\ [KC] &= KC_{ij} = \int_{\Omega} D_c^* \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega \\ [GC] &= GC_{ij} = \int_{\Omega} D_h^* N_i \left(\frac{\partial N_j}{\partial x} h_l N_l + \frac{\partial N_j}{\partial y} h_l N_l \right) d\Omega \\ [RC] &= RC_{ij} = \int_{\Omega} N_i \left(1 + \frac{\alpha}{sh} \right) \frac{\partial h_l}{\partial t} N_l d\Omega \\ [SC] &= SC_{ij} = \oint_l N_i N_j dl \\ \{FC\} &= FC_i = \oint_l N_i C_{en} \{ B_c + B_h (h_{en} - h) \} dl \end{aligned}$$

Reescrevendo a Equação 4.69 em uma forma simplificada:

$$[MC] \frac{\partial \{C_{fc}\}}{\partial t} + [KC^*] \{C_{fc}\} = (B_c + B_h(h_{en} - h)) \{FC\} \quad (4.70)$$

Onde:

$$[KC^*] = [KC] - [GC] - [RC] + B_c[SC]$$

4.4.1. Passo no tempo pelo Método das Diferenças Finitas

Utilizando o Método das Diferenças Finitas para obter uma solução numérica para a Equação 4.68:

$$\begin{aligned} ([MC] + \theta \Delta t [KC^*]) \{C_{fc}\}^{t+\Delta t} \\ = ((\theta - 1) \Delta t [KC^*] + [MC]) \{C_{fc}\}^t \\ + (B_c + B_h(h_{en} - h)) \Delta t \{FC\} \end{aligned} \quad (4.71)$$

4.5. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA

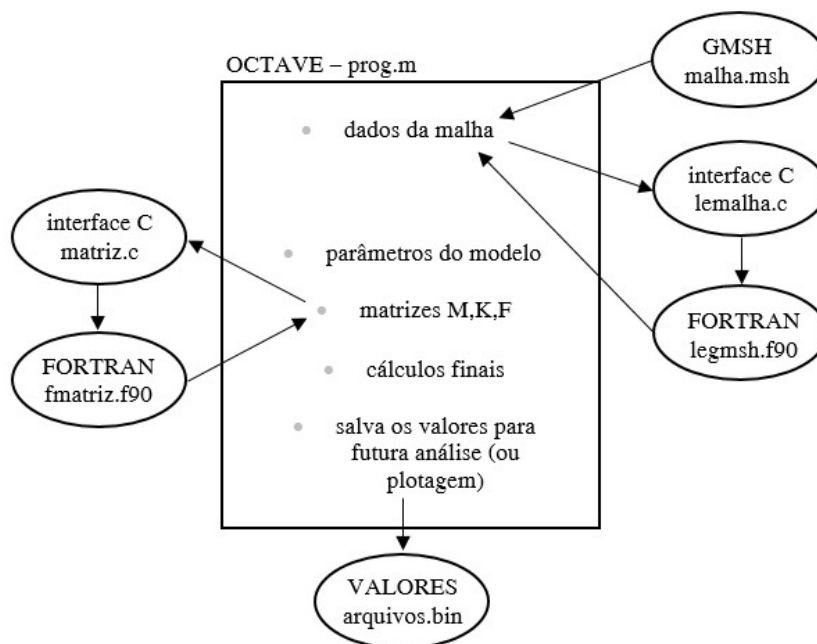
O programa foi desenvolvido usando o *software* livre GNU Octave¹, no sistema operacional Linux. Para a geração das malhas de elementos finitos é utilizado o software livre GMSH². Além do GNU Octave e do GMSH também foi necessário desenvolver alguns códigos utilizando a linguagem C e o Fortran.

No GMSH é possível desenhar a estrutura e depois gerar a malha desejada. A malha é salva em um arquivo *.msh* que contém todas as informações necessárias como: todos os nós e suas coordenadas e todos os elementos e suas características.

O Fortran permite a criação de programas que primam pela velocidade de execução. Por isso ele é muito utilizado em análises numéricas. Então, para economizar tempo, os cálculos mais demorados como os das matrizes foram feitos em Fortran. Para fazer a interface entre o Fortran e o Octave, é utilizado um programa na linguagem C. A Figura 4.5 ilustra essas etapas e interfaces.

¹ GNU Octave. Disponível em: <<https://www.gnu.org/software/octave/>>. Acesso em out. 2017.

² GMSH. Disponível em: <<http://gmsh.info/>>. Acesso em out. 2017.

Figura 4.5: Etapas e interfaces para o desenvolvimento do programa.

Fonte: Elaborada pela autora.

4.5.1. Dificuldades na implementação do modelo

Durante a implementação do modelo, foram detectados alguns problemas de instabilidade no cálculo dos valores do contorno. Esses problemas foram solucionados resolvendo a equação de transferência de calor separada das equações de fluxo de umidade e transporte de cloretos.

Observou-se que o passo de tempo ideal para o cálculo da transferência de calor era de 1 hora, ou seja, 3600 segundos. Além disso, adotou-se que a temperatura variava senoidalmente ao longo de 1 ano. Então, optou-se por calcular a distribuição de temperatura (x, y) em toda a estrutura a cada 1 hora, durante um período total de 1 ano.

Os cálculos do fluxo de umidade e do transporte de cloretos foram realizados juntos, e o passo de tempo adotado foi de 5 dias. Sendo assim, não seria preciso ter valores de temperatura a cada 1 hora, e sim a cada 5 dias.

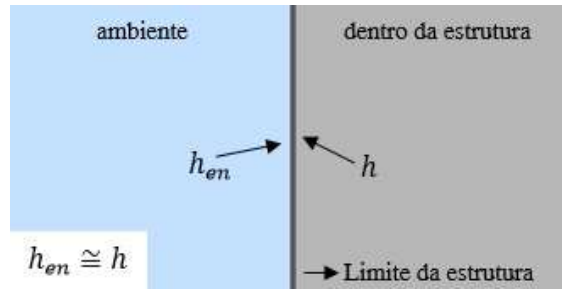
Então, a distribuição de temperatura foi calculada de hora em hora, mas armazenada apenas a cada 5 dias. Sendo assim, para 365 dias do ano, a temperatura foi armazenada 73 vezes, formando uma matriz de 73 colunas com o número de linhas equivalente ao número de nós da malha utilizada. Ao fim de 1 ano, essa matriz de temperatura se repetia no cálculo do fluxo de umidade e de transporte de cloretos.

Para o cálculo do fluxo de umidade e do fluxo de cloretos, foi preciso fazer algumas considerações, pois mesmo com um passo de tempo de 5 dias, o programa ainda apresentava instabilidade no contorno.

Estava sendo aplicada a condição de contorno de Neumann, isto é, o fluxo através do limite é especificado. Foi observado que os coeficientes de transferência de umidade e de cloretos na superfície tem valores altos (utilizado B_h e B_c igual a $1m/s$) se comparados aos coeficientes de difusão de umidade e de cloretos (D_h na ordem de 10^{-10} e D_c^* na ordem de 10^{-12}).

Isso significa que, no mesmo instante, a umidade no limite do lado de dentro da estrutura é praticamente igual a umidade no limite do lado de fora da estrutura (ver Figura 4.6) e pode-se utilizar a condição de contorno de Dirichlet como uma aproximação. O mesmo é valido para a concentração de cloretos.

Figura 4.6: Aproximação no limite da estrutura



O fluxo através do limite (condição contorno de Neumann) pode ser aproximado por um valor especificado (condição de contorno de Dirichlet). Para a umidade:

$$\oint_l w D_h \frac{\partial h}{\partial n} dl \cong h_{en} \quad (4.72)$$

Para cloretos:

$$\oint_l w D_c^* \frac{\partial C_{fc}}{\partial n} dl \cong C_{en} \quad (4.73)$$

Essa aproximação é válida quando a umidade e a concentração de cloretos são constantes ou variam pouco ao longo no tempo. No caso de uma função degrau, como nos ciclos de secagem e molhagem, onde C_{en} e h_{en} mudam bruscamente, essa aproximação não funciona muito bem.

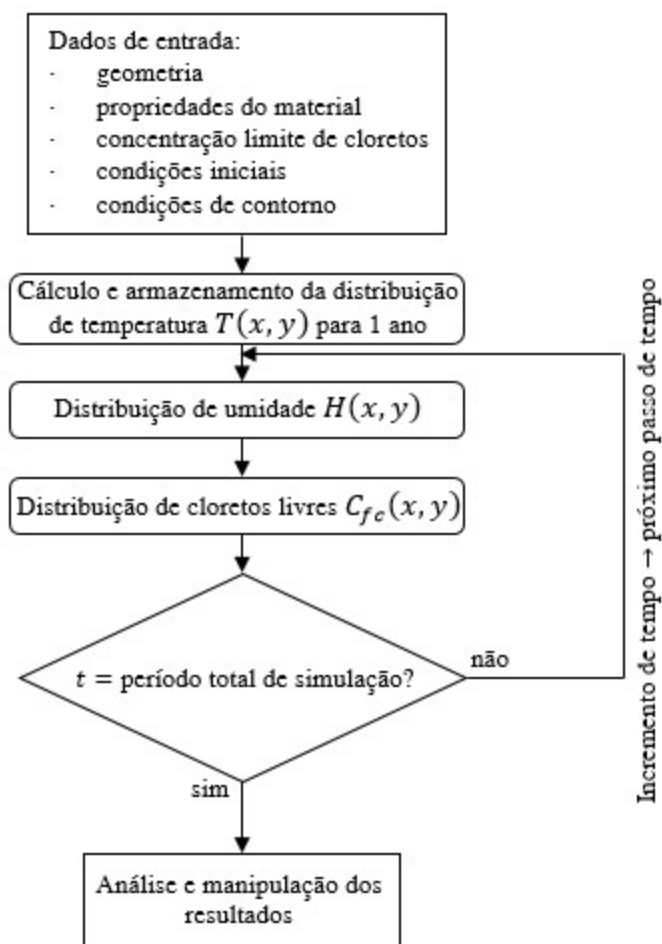
4.5.2. Fluxograma do programa

A partir do que foi exposto nos tópicos anteriores, o algoritmo de solução do problema prossegue da seguinte forma:

1. Entrada da geometria geral da estrutura, propriedades do material, valor da concentração limite de cloretos e condições iniciais e de contorno.
2. Solução da distribuição de temperatura $T(x, y)$ em todo o concreto a cada 1 hora para o período de 1 ano.
3. Armazenamento dos valores de temperatura a cada 5 dias, em uma matriz de 73 colunas com o número de linhas equivalente ao número de nós da malha utilizada.
4. Tempo inicial.
5. Solução da umidade relativa $h(x, y)$ dos poros do concreto. A umidade relativa depende da temperatura, do tempo de exposição e dela mesma (equação não-linear). Para tornar a equação linear, será utilizada a umidade calculada no passo de tempo anterior.
6. Solução da concentração de cloretos livres $C_{fc}(x, y)$ (depende da temperatura, da umidade e do tempo de exposição).
7. O tempo é incrementado de $\Delta t = 5 \text{ dias}$ e volta-se para o passo 4 até atingir o período total da simulação. A cada 1 ano, a matriz de temperatura armazenada é repetida. Se nesse tempo a concentração total de cloretos atingiu um valor crítico, a corrosão é assumida como iniciada.

A Figura 4.7 ilustra as etapas descritas acima.

Figura 4.7: Fluxograma do modelo



Fonte: Elaborada pela autora.

Capítulo 5:

APLICAÇÃO DO MODELO: SIMULAÇÕES E ANÁLISES

5. APLICAÇÃO DO MODELO: SIMULAÇÕES E ANÁLISES

5.1. APLICAÇÃO DO MODELO

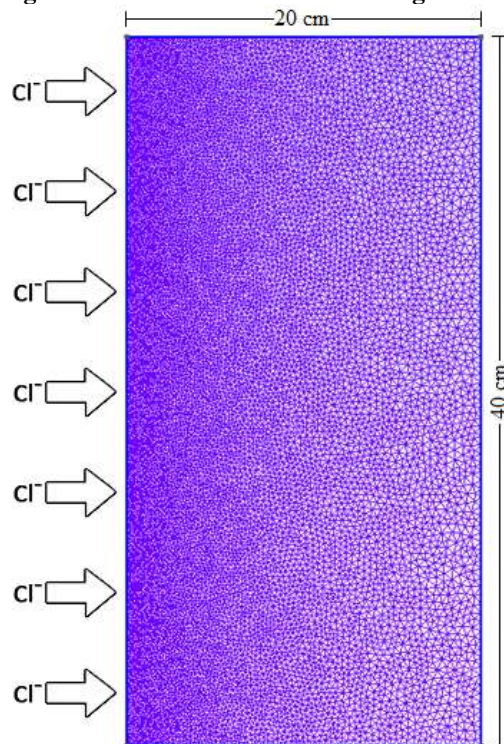
O desempenho numérico do modelo matemático desenvolvido foi examinado analisando a influência dos parâmetros estabelecidos e dos mecanismos de transporte considerados (difusão e convecção) para certas condições de exposição. Ele será aplicado para prever a concentração de cloretos em uma estrutura, após um tempo determinado.

Os resultados foram obtidos para uma viga de fachada em concreto armado de 20 cm de largura e 40 cm de altura. A viga foi considerada estando exposta às condições ambientais apenas pela sua face esquerda. Então, para melhorar a precisão dos resultados, os elementos finitos na face esquerda foram estabelecidos sendo 3 vezes menores que os elementos finitos na face direita, como pode ser observado na Figura 5.1. A malha foi gerada através do software GMSH. A Tabela 5.1 informa os dados da geometria e malha da viga utilizada.

Tabela 5.1: Dados da geometria e malha da viga.

Dados da geometria e malha da viga e parâmetros do tempo		
Geometria	Largura	20 cm
	Altura	40 cm
Malha	Tipo de elementos	triangular
	Ordem	1 (linear)
	Tamanho do elemento	$0,001667 \text{ cm} \leq dx \leq 0,005 \text{ cm}$
	Número de nós	12935
	Número de elementos	25868

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.1: Geometria e malha da viga analisada

Fonte: Elaborada pela autora.

A viga foi considerada estando localizada na cidade de Vitória, Espírito Santo, em zona marinha, em condições severas de exposição. Os dados climáticos da cidade (temperatura e umidade) foram retirados do BDMEP³ (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa), para o ano de 2000. O cálculo da transferência de calor foi realizado separadamente, pelas questões apresentadas em 4.5.1.

Para todas as simulações, com exceção das que consideram ciclos de secagem e molhagem, foram consideradas as mesmas condições iniciais e de exposição.

A concentração de cloretos inicial na viga foi mantida nula (não há contaminação dos materiais constituintes do concreto). A concentração superficial de cloretos manteve-se constante, adotando-se um valor de 5% em relação a massa de cimento. Esse valor foi determinado a partir de Song et al. (2008) e Gjorv (2015). Song et al. (2008) consideram valores nessa faixa para zonas de respingo de maré e Gjorv (2015) para zonas de ação ambiental alta.

³ BDMEP. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em ago. 2017.

Para a consideração do grau de hidratação, deve-se determinar o tipo de cimento utilizado. O cimento mais empregado na região é o CP-III, entretanto, devido a grande sensibilidade do coeficiente de difusão em relação ao fator de redução com a idade e a grande variabilidade deste parâmetro, considerou-se uma situação menos favorável, com um concreto de cimento CP-I ($m = 0,264$) (DOMINICINI, 2016).

Os parâmetros utilizados como dados de entrada no modelo estão expostos na Tabela 5.2. Os valores foram retirados dos modelos numéricos apresentados no Capítulo 3.

Tabela 5.2: Parâmetros utilizadas na aplicação do modelo

	Parâmetros	Valor
Temperatura	Temperatura inicial no concreto	$T_0 = 296K = 23\text{ °C}$
	Temperatura de referência	$T_{ref} = 296K = 23\text{ °C}$
	Massa específica × Calor específico do concreto	$\rho_c c_c = 1,932 \times 10^6 J/m^3 K$
	Condutividade térmica	$\lambda = 1,4 W/mK$
	Temperatura máxima ambiente	$T_{m\acute{a}x} = 307,7K = 34,7\text{ °C}$
	Temperatura mínima ambiente	$T_{m\acute{i}n} = 288,2K = 15,2\text{ °C}$
	Dia de máxima anual	$dia_{T_{m\acute{a}x}} = 319$
	Coeficiente de transferência de calor na superfície	$B_c = 0,07 W/m^2 K$
Umidade	Umidade inicial no concreto	$h_0 = 0,7$
	Coeficiente de difusão de umidade de referência	$D_{h,ref} = 2,0 \times 10^{-10}$
	Parâmetro que representa a relação $D_{h,min}/D_{h,m\acute{a}x}$	$\alpha_0 = 0,05$
	Umidade com que D_h está entre seu máx. e mín.	$h_c = 0,75$
	Parâmetro que caracteriza a propagação da gota	$n = 6$
	Umidade máxima ambiente	$h_{m\acute{a}x} = 0,9425$
	Umidade mínima ambiente	$h_{m\acute{i}n} = 0,5375$
	Dia de máxima anual	$dia_{h_{m\acute{a}x}} = 312$
Cloretos	Coeficiente de transferência de umidade na superfície	$B_h = 1,0\text{ m/s}$
	Concentração inicial de cloretos no concreto	$C_0 = 0$
	Coeficiente de difusão de cloretos de referência	$D_{c,ref} = 1 \times 10^{-12} m^2/s$
	Energia de ativação de difusão de cloretos	$U = 44,6 kJ/mol$
	Constante dos gases	$R = 8,314 \times 10^{-3} kJ/(Kmol)$
	Fator de redução da idade	$m = 0,264$
	Idade de referência	$t_{ref} = 120\text{ dias}$
	Concentração superficial de cloretos	$C_{en} = 5\% \text{ massa de cimento}$
Ligação de cloretos	Coeficiente de transferência de cloretos na superfície	$B_c = 1,0\text{ m/s}$
	Inclinação da linha	$\alpha = 0,07$
	Porosidade	$s = 0,12$

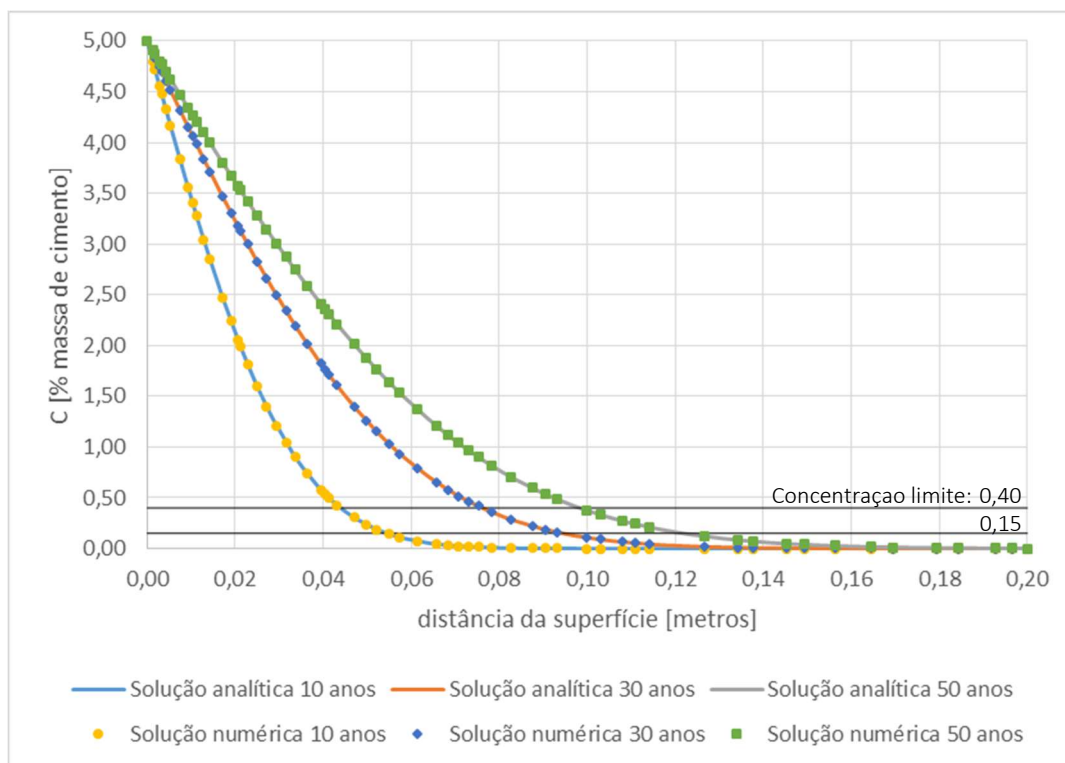
Fonte: Elaborada pela autora.

Os valores da concentração limite de cloretos para algumas normas foram apresentados na Tabela 2.1. Para o Brasil, a NBR 12655 (ABNT, 2015) assume o valor limite de cloretos para o concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura como 0,15% sobre a massa de cimento. Esse será o valor utilizado como valor limite para a viga analisada nesse capítulo. Também será feita a análise considerando o valor limite de 0,40% sobre a massa de cimento, que é indicado para concreto armado em brandas condições de exposição. Esse último valor será utilizado apenas para entender a diferença que um valor menos conservador provoca no resultado. Para cada gráfico de perfil de cloretos que será apresentado a seguir (5.2, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.13, 5.14, 5.15, 5.19), há uma marcação informando a concentração limite de cloretos, de 0,15% e de 0,40% sobre a massa de cimento.

5.2. VERIFICAÇÃO DO MODELO COM A SOLUÇÃO ANALÍTICA

Para analisar a validade e precisão do modelo numérico desenvolvido, utilizou-se a solução analítica da 2ª Lei de Fick (Equação 2.6) para comparação. Nessa etapa foi considerada somente a difusão de cloretos (não inclui convecção) e o coeficiente de difusão foi assumido como constante ($D_c = 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$), ou seja, os resultados obtidos não dependem da temperatura, da umidade e do tempo de exposição. Também não foi considerada a ligação ($D_c^* = D_c$).

As simulações foram feitas para os períodos de 10, 30 e 50 anos e os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 5.2.

Figura 5.2: Comparação entre a solução analítica e a solução numérica para difusão simples

Fonte: Elaborada pela autora.

Como é possível observar através da Figura 5.2, os valores encontrados para a simulação analítica e a solução numérica se sobrepõem (são iguais), mostrando que o modelo desenvolvido está coerente para a difusão.

5.3. VERIFICAÇÃO DO MODELO COM O COEFICIENTE DE DIFUSÃO VARIANTE NO TEMPO E NO ESPAÇO

Como visto, o coeficiente de difusão depende da temperatura, da umidade e do tempo de exposição. No modelo desse trabalho, as equações de temperatura e umidade estão acopladas. Dessa forma, para cada nó, em cada instante de tempo, há um valor diferente de temperatura e umidade.

Nessa simulação, serão comparados os resultados obtidos para o modelo desse trabalho e para o modelo de Dominicini (2016), já validado em Dominicini et al. (2017) e Moreira et al. (2017). Como descrito em 3.2.4., Dominicini (2016) propôs um modelo baseado em Martín-Pérez (1999)

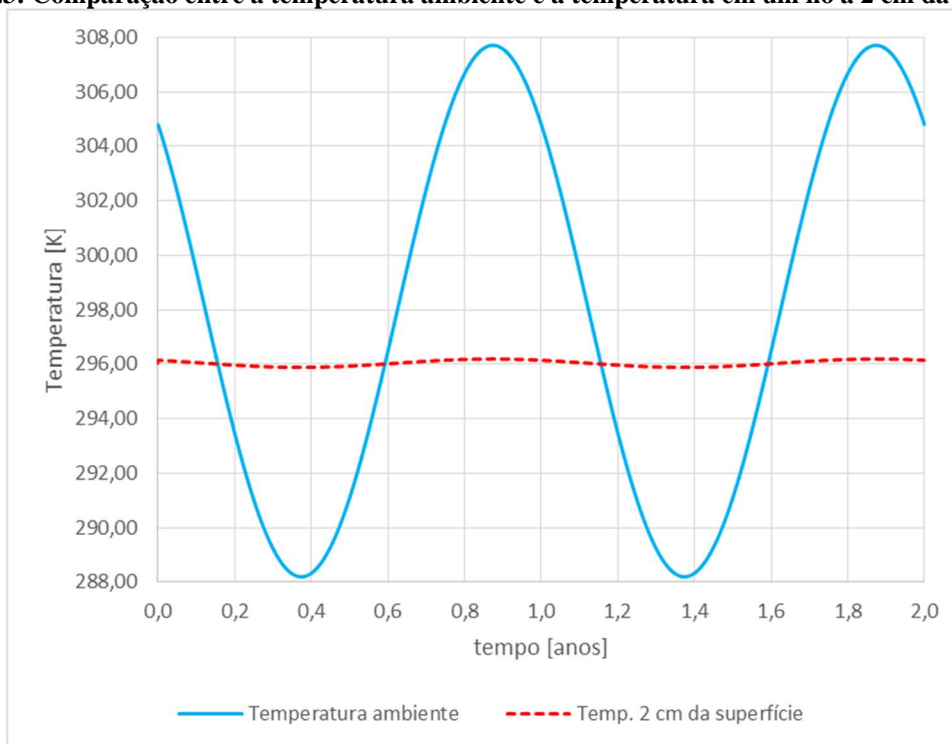
e em Tavares (2013). Ele descreve apenas a difusão, e as equações de temperatura e de umidade não estão acopladas. Nessa simulação, também não será considerada a ligação de cloretos.

Quando se emprega somente a difusão, a diferença do modelo aqui desenvolvido para o de Domincini (2016) está nos valores de temperatura e umidade que são utilizados nos cálculos dos fatores de dependência $f_1(T)$ e $f_3(h)$.

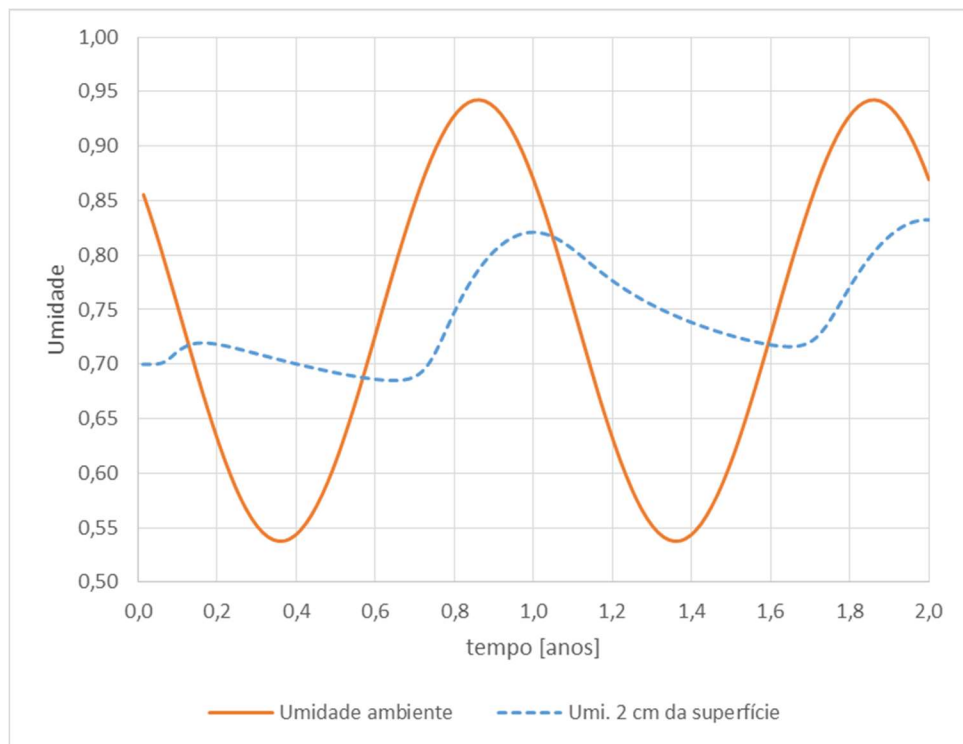
Sabe-se que o concreto é um excelente isolante térmico, e o seu coeficiente de transferência de calor na superfície é pequeno ($B_T = 0,07W/m^2\text{°C}$). Isso significa que uma variação grande na temperatura ambiente é transferida em uma amplitude muito menor para dentro do concreto. Como exemplo, a Figura 5.2 mostra a variação da temperatura ambiente (T_{en}) e a temperatura em um nó localizado a 2 cm da superfície durante um período de 2 anos.

Para a umidade, como visto em 4.5.1., acabou-se utilizando condição de contorno de Dirichlet. É de esperar que o fluxo de umidade dentro do concreto ocorra em uma amplitude maior do que a transferência de calor. Como exemplo, a Figura 5.3 mostra a variação da umidade ambiente (h_{en}) e a umidade em um nó localizado a 2 cm da superfície durante um período de 2 anos.

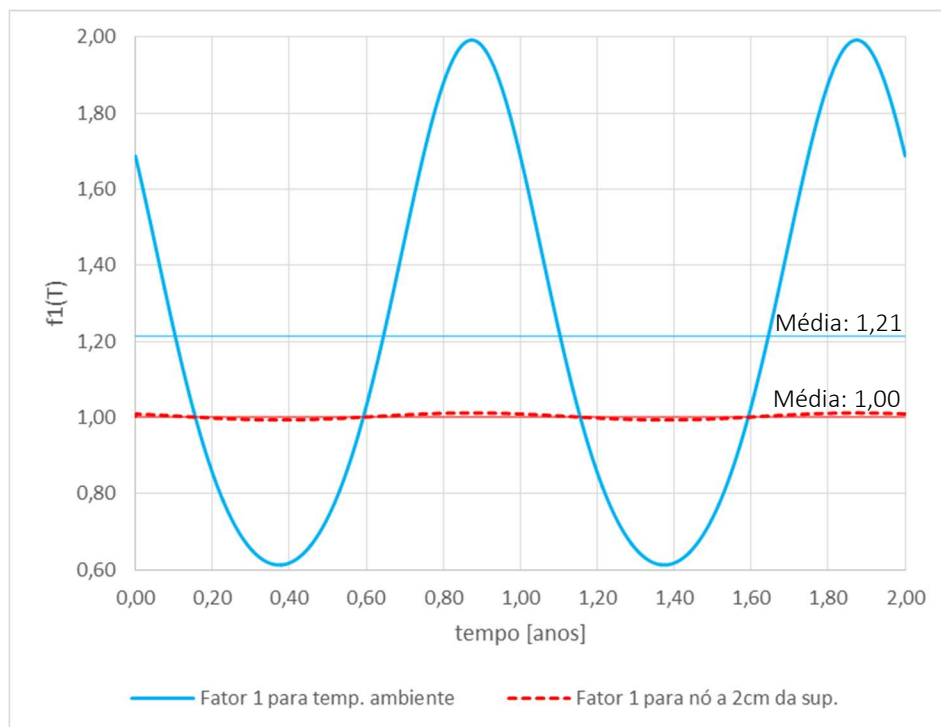
Figura 5.3: Comparação entre a temperatura ambiente e a temperatura em um nó a 2 cm da superfície.



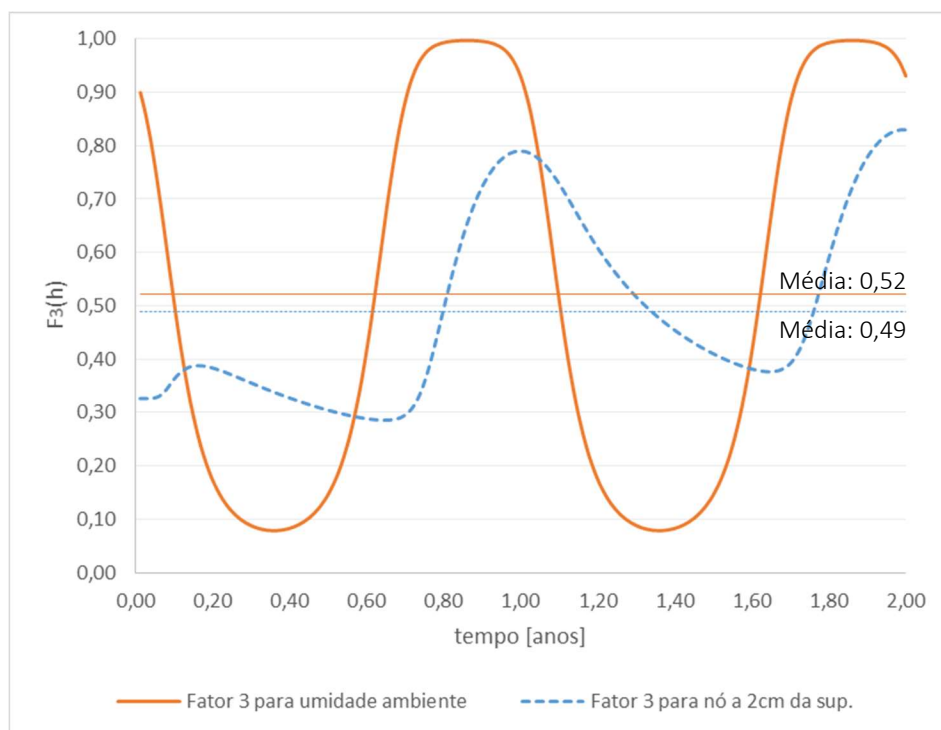
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.4: Comparação entre a umidade ambiente e a umidade em um nó a 2 cm da superfície.**Fonte: Elaborada pela autora.**

Pode-se calcular $f_1(T)$ e $f_3(h)$ para os valores obtidos nas Figuras 5.3 e 5.4. As Figuras 5.5 e 5.6 mostram os valores dos fatores calculados e a média obtida para eles. Pode-se observar que os valores dos fatores quando se considera a transferência de calor e o fluxo de umidade são menores do que quando considera a temperatura e a umidade iguais a do ambiente.

Figura 5.5: $f_1(T)$ considerando a temperatura ambiente e a temperatura a um nó a 2 cm da superfície.

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.6: $f_3(h)$ considerando a umidade ambiente e a umidade a um nó a 2 cm da superfície.

Fonte: Elaborada pela autora.

Para o fator de dependência do tempo de exposição, $f_2(t_e)$, o cálculo é feito da mesma forma para os dois casos. A Tabela 5.3 mostra os resultados obtidos multiplicando os 3 fatores de dependência.

Tabela 5.3: Comparação entre os fatores de dependência utilizando aproximação com o ambiente e com temperatura e umidade acopladas

	Aproximação com o ambiente	Temperatura e umidade acopladas
$f_1(T)$ médio	1,213722	1,001738
$f_2(t_e)$ médio	0,693200	0,693200
$f_3(h)$ médio	0,521770	0,489117
$f_1(T) \cdot f_2(t_e) \cdot f_3(h)$	0,438992	0,339645

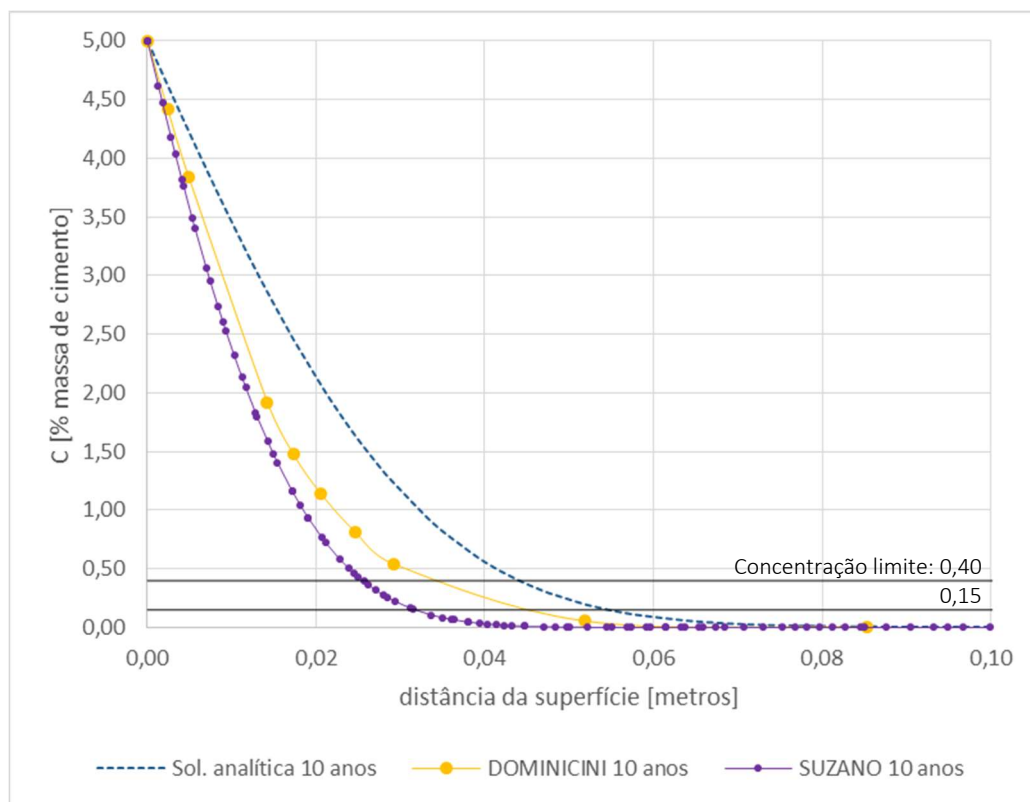
Fonte: Elaborada pela autora.

Pela Tabela 5.3 pode-se verificar que o resultado para os três fatores multiplicados é menor quando se considera a transferência de calor e o fluxo de umidade do que quando é feito a aproximação com o ambiente.

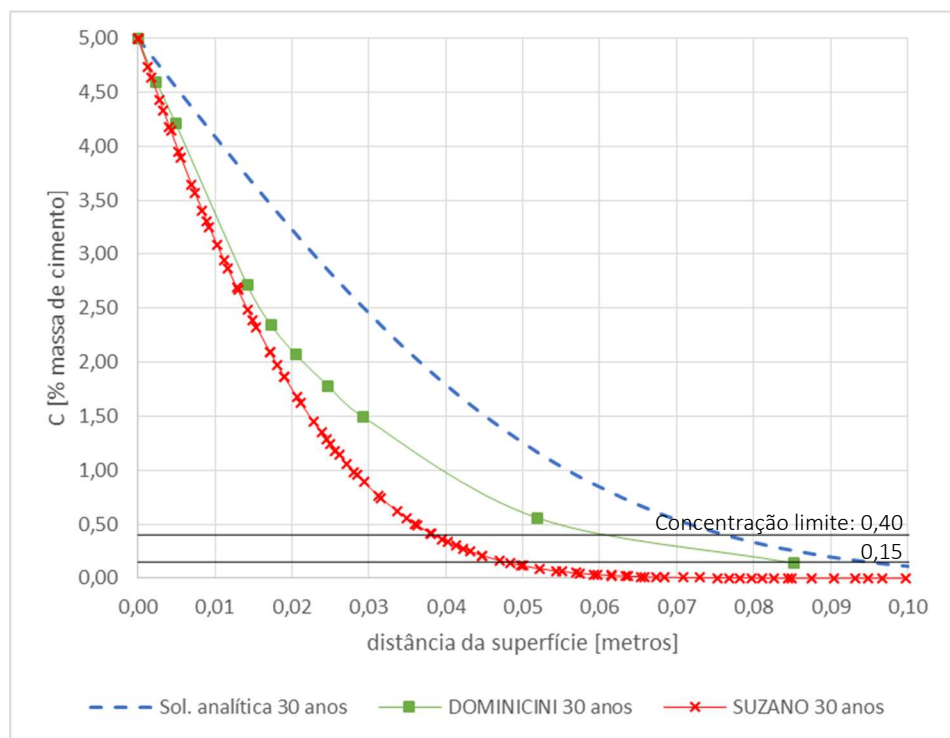
Lembrando que nos cálculos da Tabela 5.3, somente foi considerado um período de 2 anos e o nó utilizado como referência encontra-se a 2 cm da superfície. Para profundidades maiores, essa diferença deve aumentar.

A análise feita acima foi apenas para entender o que se esperar quando o modelo desenvolvido nesse trabalho for comparado com o de Dominicini (2016): o modelo de Dominicini (2016) deve apresentar seu resultado mais conservador, com valores entre a solução analítica e os que aqui foram obtidos.

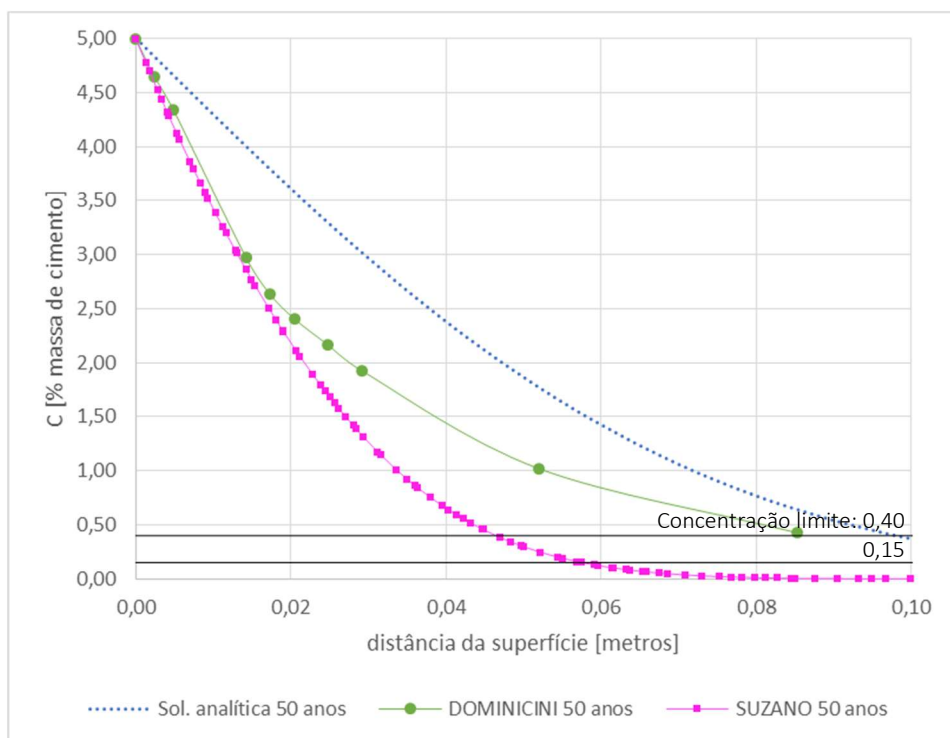
As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 mostram a comparação entre a solução analítica, o modelo de Dominicini (2016) e modelo desenvolvido nesse trabalho para os períodos de 10, 30 e 50 anos.

Figura 5.7: Comparação entre a solução analítica, Dominicini (2016) e o modelo desse trabalho para 10 anos

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.8: Comparação entre a solução analítica, Dominicini (2016) e o modelo desse trabalho para 30 anos

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.9: Comparação entre a solução analítica, Dominicini (2016) e o modelo desse trabalho para 50 anos

Fonte: Elaborada pela autora.

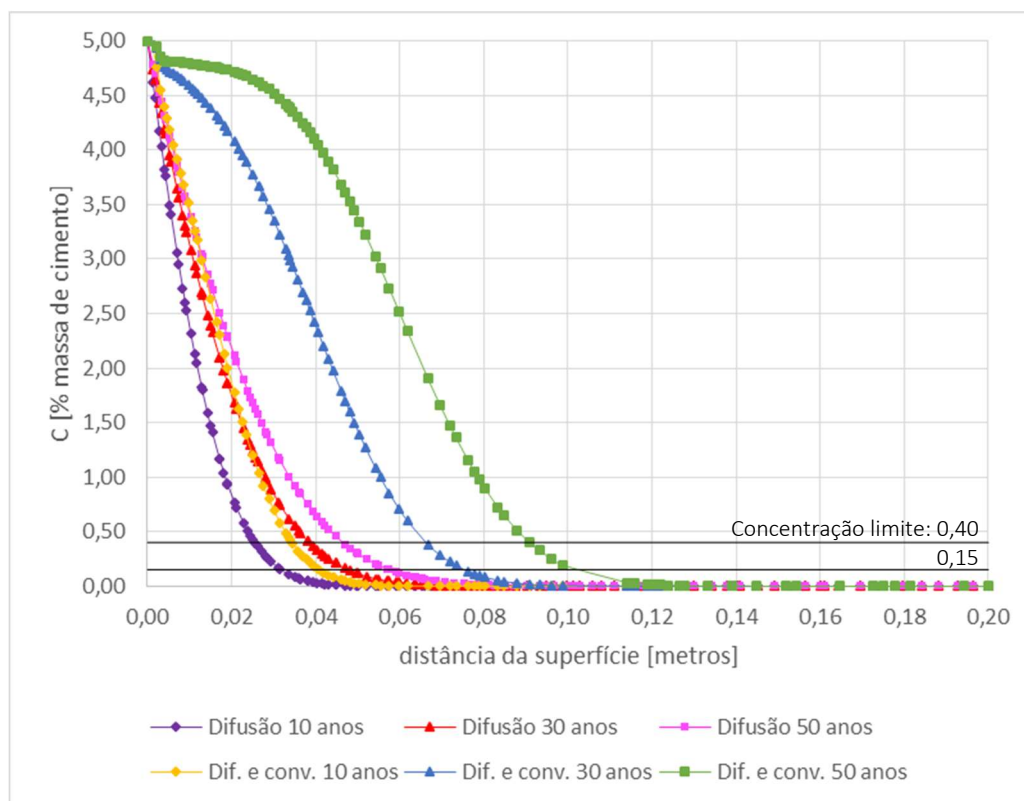
As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 mostraram o resultado esperado, confirmando mais uma vez, a validade do modelo desenvolvido nesse trabalho. Importante observar que, ao considerar a temperatura e a umidade acopladas ao mecanismo difusão o modelo se torna muito mais realista.

5.4. VERIFICAÇÃO DO MODELO COM CONVECÇÃO

Foi calculado o transporte de cloretos considerando os dois principais mecanismos: difusão e convecção. Nessa simulação, tanto o coeficiente de difusão de cloretos quanto o coeficiente de difusão de umidade variam no tempo e no espaço, em função da temperatura, umidade e tempo de exposição. Não é considerada a ligação de cloretos.

Na Figura 5.10, os resultados obtidos considerando apenas difusão são comparados com os resultados considerando difusão e convecção para 10, 30 e 50 anos.

Figura 5.10: Comparação entre resultados considerando somente a difusão e considerando difusão e convecção combinadas



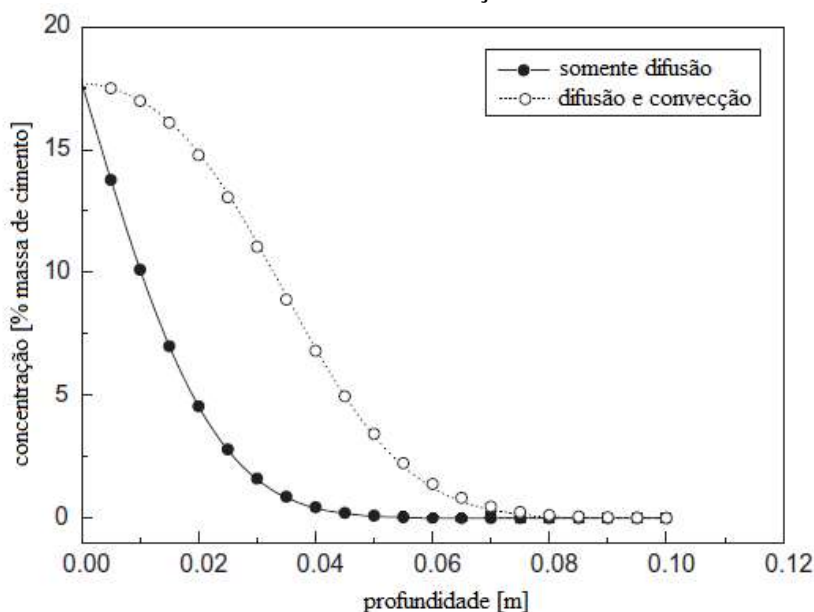
Fonte: Elaborada pela autora.

Através da Figura 5.10 é possível ver que, com a inclusão da convecção, o valor da concentração de cloretos sofre um aumento significativo. Pode-se observar que, a qualquer profundidade fixa, a concentração de cloretos quando se considera convecção é muito maior do que quando somente se considera a difusão. Isto é devido a difusão de umidade acoplada a penetração de cloretos. O efeito do acoplamento contribui significativamente para o transporte de cloretos em concreto parcialmente saturado.

Analisando as curvas com convecção, pode-se observar que perto da superfície (até 0,5 cm de profundidade), há um comportamento diferente no valor da concentração de cloretos. Essa diferença apresentada se dá devido a aproximação que foi utilizada considerando condição de contorno de Dirichlet. A partir de 0,5 cm, essa diferença se equilibra, e a curva de convecção apresenta o formato esperado.

A Figura 5.11 mostra resultados encontrados por Lin et al. (2010) considerando somente difusão e considerando difusão e convecção juntas, também sem incluir a ligação de cloretos. Os valores utilizados não são os mesmos que foram empregados aqui, mas é interessante observar o formato das 2 curvas.

Figura 5.11: Resultados encontrados por Lin et al. (2010) considerando apenas difusão e considerando difusão e convecção



Fonte: Adaptada de Lin et al. (2010, p. 575)

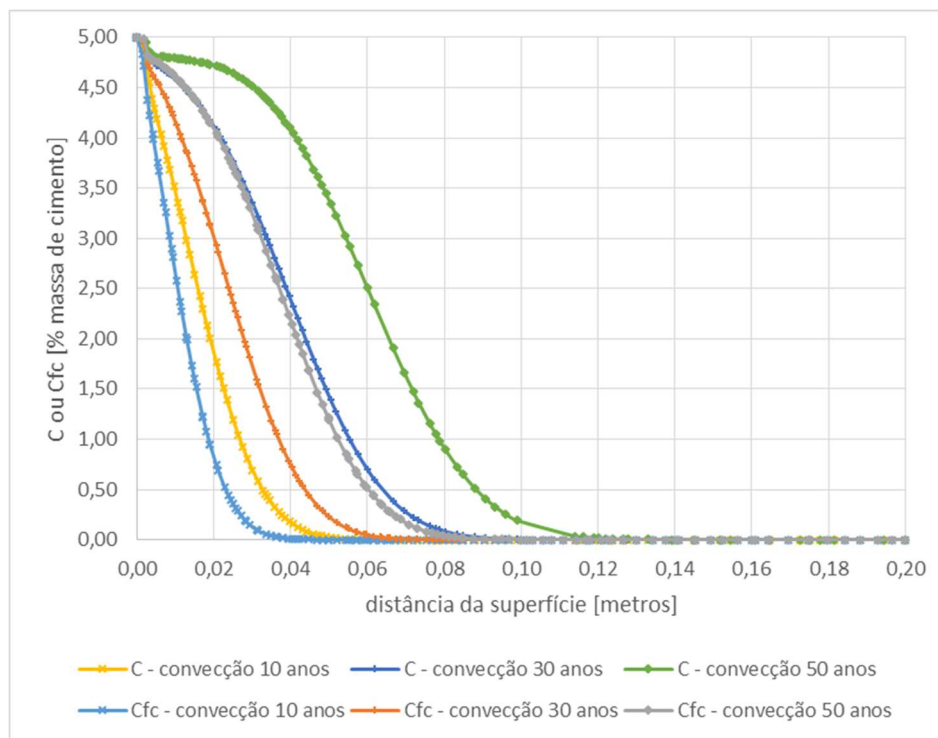
Comparando a Figura 5.10 com a Figura 5.11 pode-se afirmar que os valores encontrados para convecção no modelo desenvolvido nesse trabalho corroboram com a literatura.

5.5. VERIFICAÇÃO DO MODELO CONSIDERANDO LIGAÇÃO DE CLORETOS

Nessa simulação foi considerada a ligação de cloretos (ligação linear) junto dos mecanismos de difusão e convecção.

A Figura 5.12 mostra os resultados obtidos quando não se considera a ligação de cloretos e quando se considera apenas os cloretos livres participando do transporte de cloretos, para 10, 30 e 50 anos.

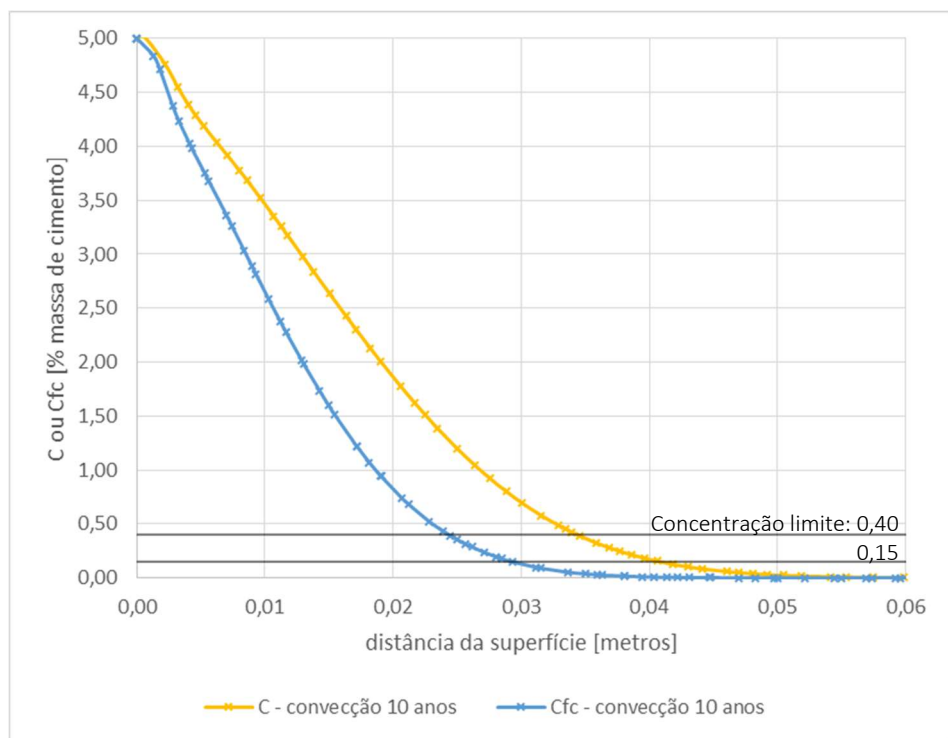
Figura 5.12: Comparação entre os resultados obtidos para a concentração de cloretos considerando cloretos ligados ou não



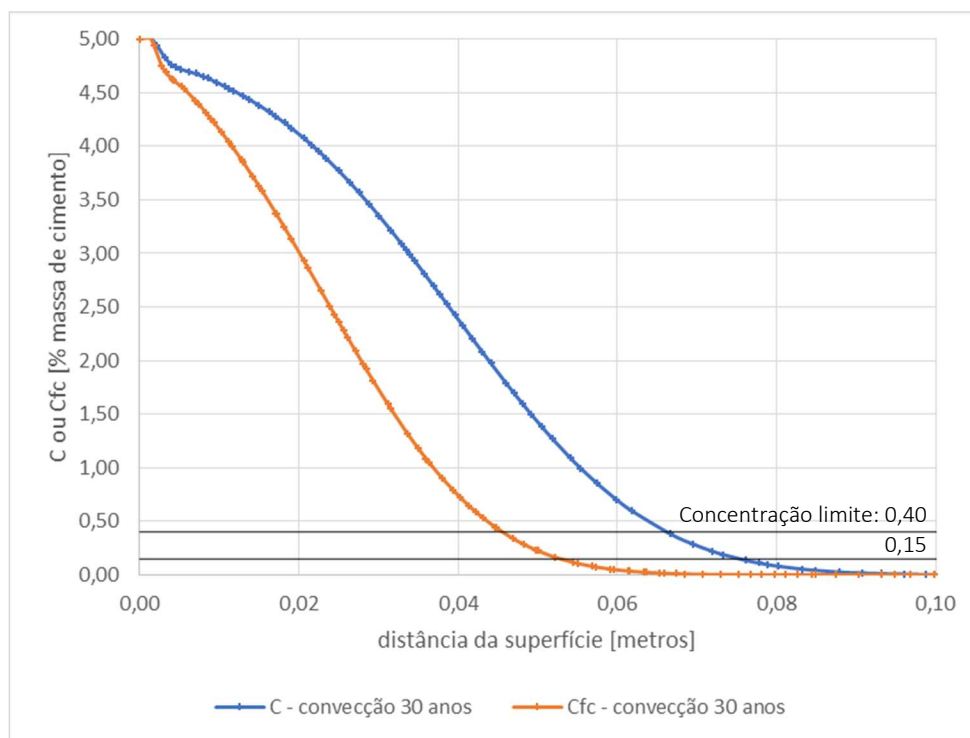
Fonte: Elaborada pela autora.

Através da Figura 5.12 pode-se verificar mais um resultado que era esperado. Não considerar a ligação de cloretos é uma atitude conservadora. Os valores de concentração obtidos considerando somente cloretos livres são inferiores aos valores obtidos para cloretos totais.

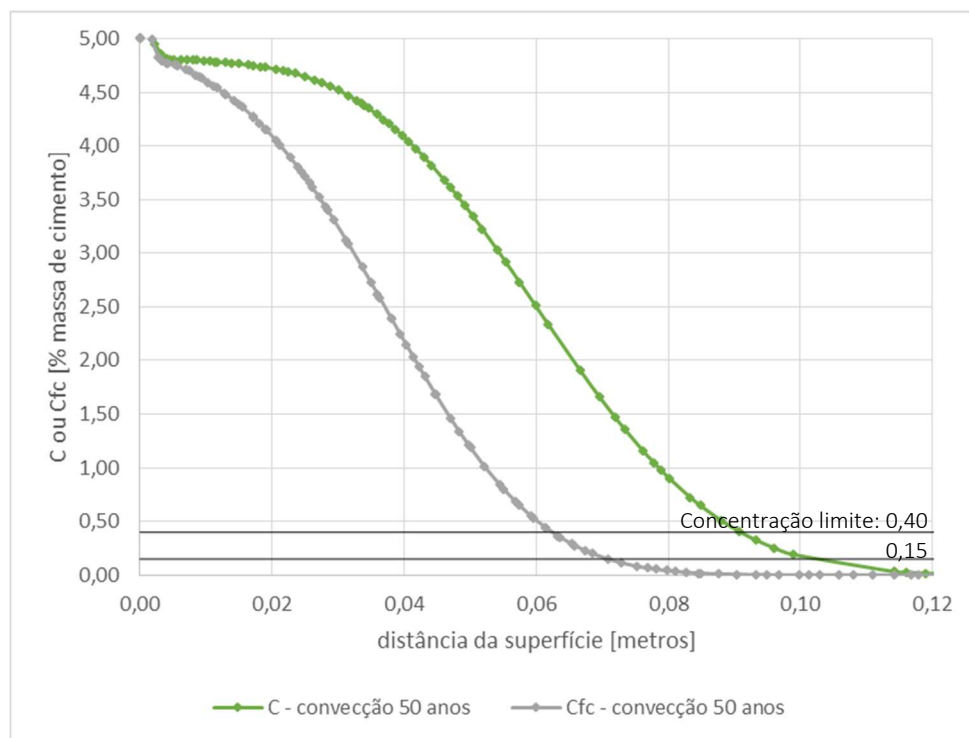
As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 a seguir mostram com mais detalhes os resultados apresentados na Figura 5.12.

Figura 5.13: Resultados obtidos considerando cloretos livres para 10 anos

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.14: Resultados obtidos considerando cloretos livres para 30 anos

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.15: Resultados obtidos considerando cloretos livres para 50 anos

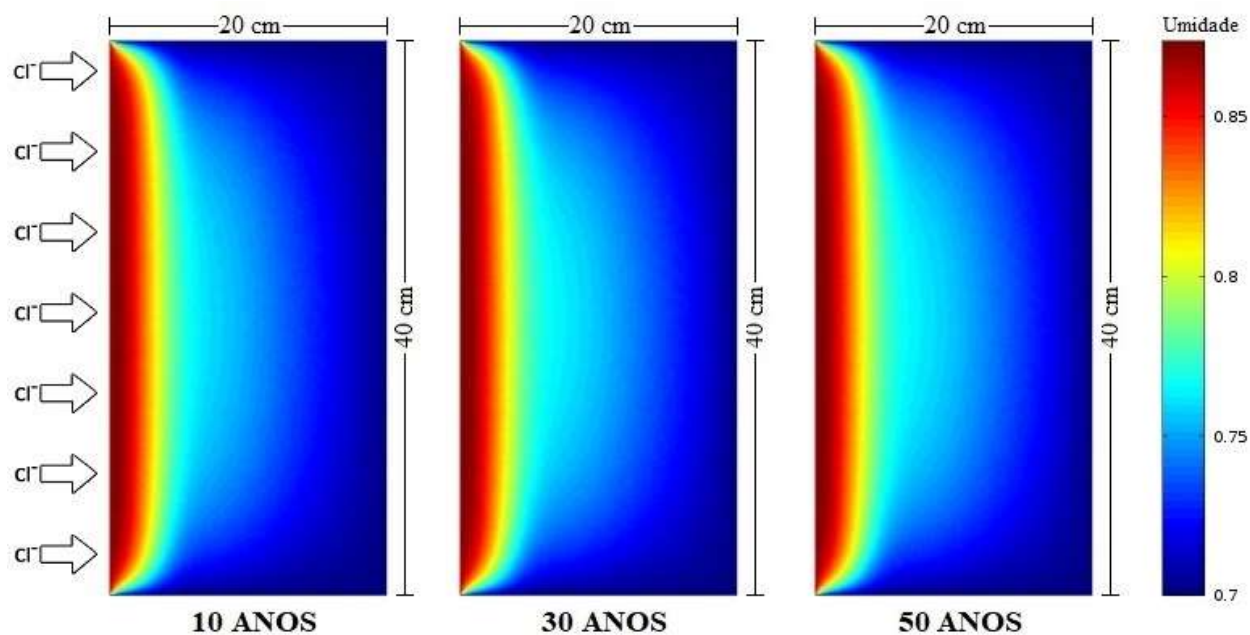
Fonte: Elaborada pela autora.

O modelo foi desenvolvido em domínio bidimensional. É possível obter além dos perfis, os valores de temperatura, umidade e concentração de cloretos por toda a viga. Para o caso analisado nessa seção (convecção e ligação de cloretos) a Figura 5.16 mostra o fluxo de umidade através da viga para 10, 30 e 50 anos. A Figura 5.17 mostra o transporte de cloretos para esses períodos.

Pode se observar através da Figura 5.16 que para um mesmo dia do ano, depois de um certo tempo, o fluxo de umidade atinge um equilíbrio. Há uma diferença muito pequena nos valores obtidos para 30 e 50 anos.

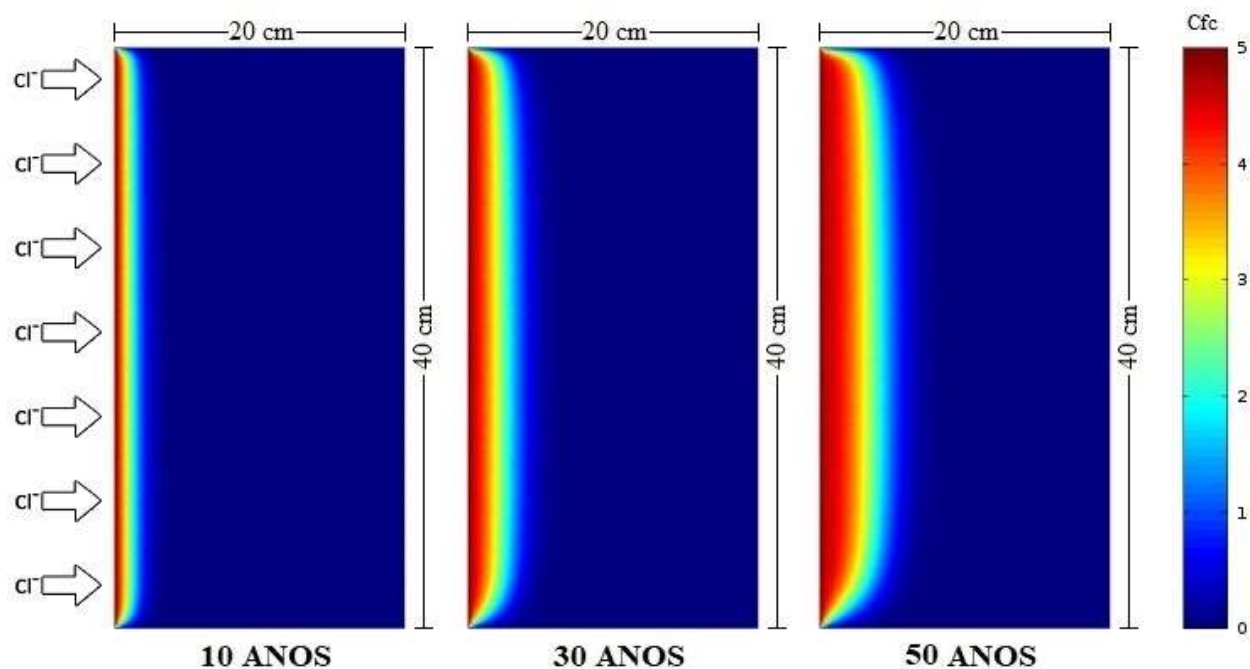
A Figura 5.17 mostra um avanço da penetração de cloretos ao longo tempo. Observe que com 10 anos, apenas uma camada bem superficial foi alterada. Se fosse adotado um tempo maior de simulação, os cloretos continuariam entrando no concreto por muitos anos até atingirem um equilíbrio com o exterior. Isso possivelmente demoraria centenas de anos para acontecer.

Figura 5.16: Fluxo de umidade através da viga para 10, 30 e 50 anos



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.17: Transporte de cloretos através da viga para 10, 30 e 50 anos



Fonte: Elaborada pela autora.

5.6. VERIFICAÇÃO DO MODELO COM CICLOS DE SECAGEM E MOLHAGEM

Como foi visto em 4.5.1, ao invés de se utilizar a condição de contorno de Neumann, utilizou a de Dirichlet. Para as simulações realizadas anteriormente, foram encontrados bons resultados.

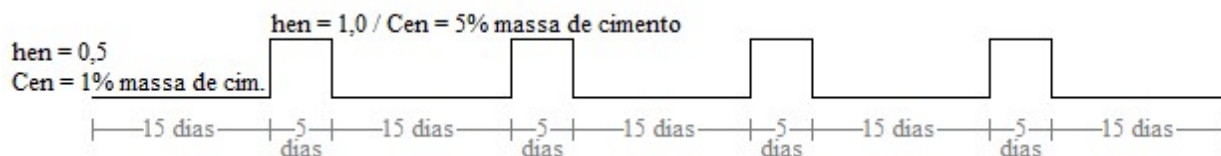
A simulação realizada nessa etapa seguiu as considerações apresentadas por Saetta et al. (1993), Martín-Pérez (1999) e Lin et al. (2010) com relação aos ciclos de secagem e molhagem.

Martín-Pérez (1999) utilizou o mesmo coeficiente de difusão na molhagem e na secagem. O movimento da umidade é um processo muito lento em comparação com a absorção de água na camada mais externa de um concreto parcialmente saturado. Por essa questão, Martín-Pérez (1999) concluiu que o mecanismo de absorção de água através da capilaridade não estava bem descrito através do seu modelo. No entanto, seu modelo simula adequadamente a fase de secagem. Por essa razão, o movimento convectivo de íons cloreto em concreto não é bem representado pela formulação proposta por Martín-Pérez (1999) quando ocorrem ciclos de molhagem e secagem do concreto.

Lin et al. (2010) diferenciou o transporte de umidade durante os períodos de secagem e molhagem adotando um coeficiente de difusão de umidade maior para os períodos de molhagem que o de secagem. Os autores obtiveram bons resultados.

Para simular os ciclos de secagem e molhagem no modelo desse trabalho foi assumida uma função de passo, em que o concreto encontra-se 15 dias secando, e 5 dias molhando. Durante a secagem, a concentração superficial de cloretos é bem menor (1% de massa de cimento) que durante a molhagem (5% de massa de cimento). Para a umidade ambiente acontece o mesmo, durante a secagem ela é considerada como sendo 0,5 e durante a molhagem como 1,0. A temperatura ambiente segue a mesma variação sazonal das outras simulações. A Figura 5.16 ilustra esse ciclo.

Figura 5.18: Ciclos de secagem e molhagem



Fonte: Elaborada pela autora.

O cálculo do coeficiente de difusão de umidade foi feito como em Lin et al. (2010), sendo considerado maior durante a molhagem do que na secagem (Equações 3.44 e 3.45). Os valores adotados se encontram na Tabela 5.4. Eles foram retirados de Lin et al. (2010).

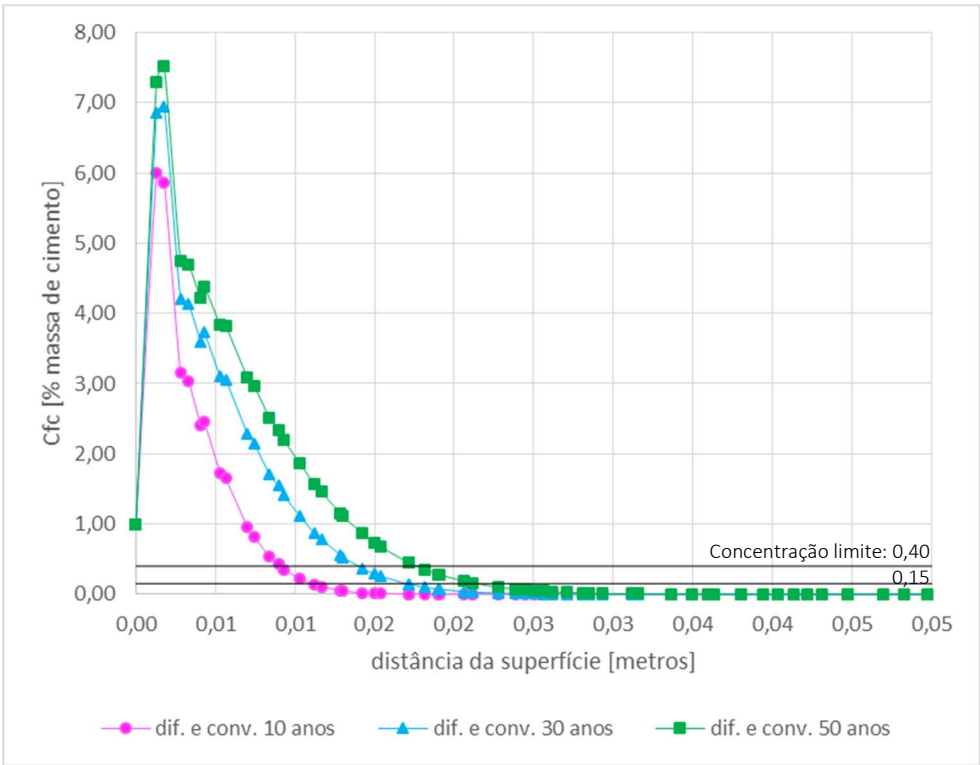
Tabela 5.4: Parâmetros para cálculo do coeficiente de difusão de umidade durante os ciclos de secagem e molhagem

Parâmetros durante a secagem e molhagem		Valor
Secagem	Coeficiente de dif. de umi. durante a secagem	$D_d^s = 2,0 \times 10^{-10} m^2/s$
	Parâmetro que representa a relação $D_{h,min}/D_{h,max}$	$\alpha_0 = 0,05$
	Umidade com que D_h está entre seu máx. e mín.	$h_c = 0,75$
	Parâmetro que caracteriza a propagação da gota	$N = 6$
Molhagem	Coeficiente de dif. de umi. durante a molhagem	$D_w^0 = 3,22 \times 10^{-10} m^2/s$
	Constante determinada empiricamente	$n = 6$
	Grau de saturação inicial	$h_0 = 0,8$
	Grau de saturação do concreto totalmente saturado	$h_1 = 0,95$

Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 5.17 mostra os perfis de cloretos livres após um período de exposição de 10, 30 e 50 anos.

Figura 5.19: Concentração de cloretos livres durante o ciclo de molhagem e de secagem para 10, 30 e 50 anos.



Fonte: Elaborada pela autora.

Através da Figura 5.17 pode se observar que a concentração de cloretos livres atinge um valor máximo cerca de 2 a 3 mm de distância da superfície, local que é chamado de zona de convecção. Esse valor é muito mais baixo do que o esperado.

Foi visto na Figura 2.5 (no Capítulo 2) que a zona de convecção depende da qualidade do concreto e das condições de exposição e varia de 10 a 20 mm. Lin et al. (2010) encontraram valores em cerca de 10 a 15 mm de distância da superfície.

Além disso, os perfis de cloretos apresentados na Figura 5.17 não apresentaram a curva suave que era esperada. Os valores perto da superfície apresentaram mudanças bruscas, que prejudicaram os resultados da simulação.

Os erros encontrados nessa simulação são devidos a aproximação com a condição de Dirichlet. As funções de passo fazem os valores da condições de contorno de Dirichlet se distanciarem muito dos valores que seriam obtidos se fosse usada a condição de contorno de Neumann.

5.7. FIM DA VIDA ÚTIL E DETERMINAÇÃO DA CAMADA DE COBRIMENTO

Considerando o fim de vida útil da estrutura como 50 anos, a Tabela 5.5 mostra os valores de cobrimento que deveriam ser utilizados para as simulações apresentadas anteriormente (exceto a que simula o ciclo de molhagem e secagem). Esses valores foram retirados das Figuras 5.2, 5.9, 5.10 e 5.15). O valor do cobrimento informa a distância segura que a armadura deve estar da superfície.

Tabela 5.5: Valores de cobrimento para o fim de vida útil de 50 anos para diversas situações

Valor limite [% massa de cimento]	Cobrimento [cm]	
	0,15	0,40
Somente difusão com coeficiente de difusão constante	12,25	9,84
Somente difusão com coeficiente de difusão em função da T, h e t_e	5,76	4,65
Somente difusão por Dominicini (2016)	-	8,40
Difusão e convecção	10,29	9,09
Difusão e convecção com ligação de cloretos (Cloretos livres)	7,09	6,25

Fonte: Elaborada pela autora.

Como pode ser observado através da Tabela 5.5, o resultado mais conservador é para o caso da difusão simples (coeficiente de difusão constante, igual a solução analítica). Para uma vida útil de

50 anos, com um valor limite de 0,15%, o cobrimento da viga deveria ser maior que 12 cm. Esse valor é absurdo, não é utilizado na prática.

Para a simulação mais completa desse trabalho, e, portanto, mais realista, que considera difusão, convecção e cloretos ligados, o cobrimento para a mesma situação descrita acima, é de aproximadamente 7,1 cm. Esse é um valor muito alto para o cobrimento, mas vale observar que foi considerada uma concentração superficial de cloretos bem alta, já que se considerou uma das situações naturais mais agressivas.

Para as condições de exposição marítimas mais severas, o ACI 318-08 e o Eurocode II especificam cobrimentos mínimos de concreto de 3 polegadas (aproximadamente 7,62 cm) (MEDEIROS et al., 2011). Isso mostra que, apesar da NBR 6118 (ABNT, 2014) não informar valores de cobrimento para esse tipo de situação, consultando as normas internacionais, verifica-se que o modelo desse trabalho mostrou resultados ótimos.

Adotar 0,15% ou 0,40% como valor limite de cloretos traz uma diferença na espessura da camada de cobrimento. Para o caso mais conservador (difusão com o coeficiente constante) essa diferença é de 2,41 cm. Para a simulação mais realista desse trabalho, a diferença é menor, sendo de 0,84 cm.

Trazendo uma outra abordagem. A NBR 6118 (ABNT, 2014) adota para uma viga de concreto armado em zonas de respingos de maré um cobrimento de 50 mm. Considerando o fim de vida útil da estrutura como 50 anos, a Tabela 5.6 mostra os valores de concentração de cloretos atingido nas proximidades da armadura para cada caso considerando o cobrimento de 50 mm segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) e de 70 mm segundo o valor obtido na Tabela 5.5.

Tabela 5.6: Valores de concentração de cloretos para um cobrimento de 5 cm e de 7 cm e fim da vida útil de 50 anos para diversas situações

Concentração de cloretos nas proximidades da armadura [% massa de cimento]	Cobrimento	
	5 cm	7 cm
Somente difusão com coeficiente de difusão constante	1,87	1,04
Somente difusão com coeficiente de difusão em função da T, h e t_e	0,30	0,04
Somente difusão por Dominicini (2016)	1,10	0,70
Difusão e convecção	3,38	1,63
Difusão e convecção com ligação de cloretos (Cloretos livres)	1,19	0,16

Fonte: Elaborada pela autora.

Através da Tabela 5.6 pode-se observar a grande diferença que 2 cm a mais na camada de cobrimento fazem nos valores de concentração de cloretos próximos a armadura.

Capítulo 6:

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Apesar da corrosão de armaduras por ação de cloretos ser um tema muito estudado desde a década de 70, existem muitas lacunas no conhecimento de seus processos. Uma quantidade considerável de modelos de previsão de vida útil já foi desenvolvida, entretanto, ainda não há uma abordagem amplamente aceita, que tenha conseguido alcançar efetivamente o mercado.

Há um esforço mundial para se conseguir modelar matematicamente com precisão o fenômeno da corrosão de armaduras, possibilitando estimar o tempo de vida útil das estruturas de concreto armado e determinar a espessura da camada de cobrimento necessária.

Primeiro, foi realizada uma intensa pesquisa sobre os modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas ao ataque de cloretos relativos à etapa de iniciação. Nessa pesquisa, concluiu-se que alguns modelos tem como referência as mesmas equações básicas. Eventualmente algum detalhe muda, e um termo a mais é implementado ou um outro deixa de ser aplicado.

Com base nessa conclusão, procurou-se analisar aqui alguns trabalhos que seguiam uma mesma sequência de raciocínio. Inicialmente foram abordados modelos que consideravam somente a solução analítica e depois outros trabalhos mais elaborados com solução numérica foram expostos.

A partir da análise dos modelos com solução numérica que aqui foram apresentados foi possível definir as equações que seriam utilizadas no modelo desenvolvido nesse trabalho.

Foram utilizadas 3 equações diferenciais parciais que descrevem a entrada de cloreto no concreto: a transferência de calor, o fluxo de umidade e o transporte de cloretos devido a difusão e a convecção. Esse conjunto de equações foi resolvido numericamente utilizando o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas.

Optou-se pela utilização somente de softwares livres. O programa principal foi desenvolvido no GNU Octave, no sistema operacional Linux. Também foram utilizadas as linguagens Fortran e C.

6.2. ASPECTOS SINGULARES DO MODELO DESENVOLVIDO

O modelo desenvolvido nesse trabalho possui alguns aspectos singulares:

- Velocidade de processamento;
- Precisão da malha;
- Adaptabilidade.

No que diz respeito a velocidade de processamento, os cálculos das matrizes que são mais demorados foram feitos em Fortran, linguagem que prima pela velocidade de execução. O sistema operacional Linux foi otimizado e o Octave foi compilado.

Essas otimizações fizeram com que o programa desenvolvido calculasse a concentração de cloretos em domínio bidimensional, para um período de 50 anos, em uma viga com cerca de 12 mil nós em aproximadamente 30 minutos. Isso, levando em consideração as equações acopladas (temperatura, umidade e cloretos), ligação de cloretos, difusão e convecção.

No que diz respeito a precisão da malha, o programa desenvolvido utiliza integração numérica, portanto, ele permite curvas, mesmo quando são utilizados elementos lineares. Na viga que foi utilizada aqui como exemplo, esse aspecto não pode ser observado. Mas, para análises futuras em que se utilize estruturas com formato mais complexo, ou até um detalhamento da armadura, essa integração numérica poderá ser interessante.

Sobre a adaptabilidade, a linguagem do programa é muito aberta. Qualquer dado pode ser alterado rapidamente. Isso possibilita inúmeras análises com infinitos resultados. Ele também permite com facilidade a inclusão de outros parâmetros.

O programa então possibilita muitas melhorias. Podem ser incluídos outros mecanismos de deterioração como carbonatação, pode-se melhorá-lo e trocar a condição de contorno para Neumann, o passo de tempo pode ser alterado se for preciso.

Enfim, o programa desenvolvido não está fechado. Ele pode ser uma porta aberta para a construção de modelos mais precisos.

6.3. CONCLUSÕES RELATIVAS ÀS SIMULAÇÕES

Foram realizadas diversas simulações para avaliar o desempenho do programa. Essas simulações trouxeram resultados bastante diferentes uma da outra.

No que diz respeito a simulação com a solução analítica, os resultados obtidos com o modelo numérico apresentaram os mesmos resultados que os encontrados para a solução analítica da 2ª Lei de Fick.

A segunda simulação abordou o coeficiente de difusão variando no tempo e no espaço. Os resultados foram comparados com os de Dominicini (2016). Observou-se que utilizar o coeficiente de difusão constante em todo o período de simulação é uma atitude bastante conservadora. Considerar a temperatura e a umidade dentro do concreto como sendo iguais as do meio ambiente (consideração utilizada em Dominicini (2016)), também não é a atitude mais realista e traz resultados mais conservadores que os obtidos quando se acopla a transferência de calor e o fluxo de umidade ao transporte de cloretos. Além disso, esse acoplamento traz resultados mais realistas.

No que diz respeito as simulações com convecção, embora não tenha sido utilizado um modelo que emprega convecção para comparação, os resultados obtidos parecem estar em conformidade com os perfis encontrados na literatura.

Não são todos os cloretos que participam da difusão e da convecção, portanto, descrever o transporte de cloretos em termos de cloretos livres é uma atitude mais realista. As simulações mostraram que quando se considera cloretos livres, os valores de concentração obtidos são menores do que quando não se considera ligação de cloretos.

Os ciclos de secagem e molhagem não foram bem representados pelo modelo. Isso foi devido a aproximação utilizada na condição de contorno, que substituiu a condição de Neumann por Dirichlet.

Por fim, foi feita uma análise que mostra qual deveria ser a espessura da camada de cobertura para cada caso simulado e qual a concentração de cloretos prevista para uma camada de cobertura pré-determinada.

Para a simulação mais completa (que considera difusão, convecção e ligação de cloretos), foi encontrado um valor de aproximadamente 7 cm para a camada de cobrimento. Um valor alto, porém coerente com a concentração superficial de cloretos utilizada que foi bem alta também.

6.4. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O principal ponto de melhoria para se fazer no modelo certamente é conseguir empregar a condição de contorno de Neumann, sem que o programa se torne instável. Se essa alteração for feita, e a condição de Neumann puder ser empregada, o programa certamente permitirá a simulação da convecção com mais precisão e poderá incluir o cálculo de estruturas que estão sujeitas a ciclos de secagem e molhagem.

Para o programa ser capaz de simular estruturas sujeitas a ciclos de maré, outro ponto terá que ser alterado, o passo de tempo. O passo de tempo que foi utilizado foi de 5 dias, e sabe-se que as flutuações de maré ocorrem no período de horas. No entanto, no estado que o programa se encontra, um passo de tempo reduzido, mesmo utilizando a condição de contorno de Dirichlet, também torna o programa instável.

Dessa forma, recomenda-se o estudo da estabilidade do modelo desenvolvido para aprimoração dos resultados.

No estágio que o modelo se encontra, foi visto que ele apresenta bons resultados para difusão e convecção, porém ele não foi validado com dados de campo. Recomenda-se então a validação do modelo com estruturas reais em condições diferentes de exposição.

Além disso, devido às diversas fontes de incertezas, considerar o tempo para o fim da vida útil como um parâmetro determinístico não é o mais apropriado. Assim, pode-se partir do modelo aqui apresentado para construir um modelo probabilístico, mais realista.

Com o amadurecimento da pesquisa e à medida que se ganhe conhecimento no tema, pode-se abranger também, o período de propagação, com maior número de fatores intervenientes e de modelagem mais complexa.

Capítulo 6: Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

No campo da pesquisa experimental, recomenda-se que sejam realizados estudos para determinar alguns parâmetros para diferentes tipos de cimentos e teores de adições. Há uma dificuldade de encontrar certos valores na literatura, e essa pesquisa experimental poderia ser bastante útil.

Capítulo 7:

REFERÊNCIAS

7. REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 222R-01: Protection of Metals in Concrete Against Corrosion**. Farmington Hills, 2001.

_____. **ACI 318-08: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary**. Farmington Hills, 2008.

ANDRADE, C. Reinforcement corrosion: Research needs. In: ALEXANDER, M. G. et al. (Eds.). **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. p. 75-82.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

BROWN, L. S.; HOLME, A. T. **Química Geral Aplicada à Engenharia**. 1ª Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. 1ª Ed. São Paulo: Pini, 1988.

COLLEPARDI, M.; MARCIALIS, A; TURRIZIANI, R. Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes. **The Journal of The American Ceramic Society**, v. 55, n. 10, p. 534-535, out. 1972.

DE OLIVEIRA ANDRADE, J. **Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão de Armaduras: Iniciação por Cloretos**. Porto Alegre, 2001. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

DOMINICINI, W. K. **Modelagem Computacional para Predição do Período de Iniciação da Corrosão em Estruturas de Concreto Armado**. 2016. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

DOMINICINI, W. K. ; CALMON, J. L.; MOREIRA, A. ; TAVARES, F. Modelagem de previsão da vida útil de estruturas de concreto armado. Validação com dados de campo. In: XIV Congresso Latino-Americano de Patología de Construcción XVI Congreso de Control de Calidad en la Construcción, 2017, Asunción - Paraguay. **Memorias del XIV Congreso Latino-Americano de**

Patología de Construcción XVI Congreso de Control de Calidad en la Construcción. Asunción: ALCONPAT Internacional, 2017. v. 1. p. 1-10.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB 53). Structural Concrete: Textbook on Behaviour, Design and Performance. **Design of durable concrete structures**, 2ª Ed., v. 3, 2010, 390 p.

GJORV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.** Revisão técnica: FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. 1ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, 1993. 248 f. Tese (Professor Livre Docente) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HILLS, T. P.; GORDON, F.; FLORIN, N. H.; FENNELL, P. S. Statical Analysis of the Carbonation Rate of Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 72, p. 98-107, 2015.

LIN, G.; LIU, Y.; XIANG, Z. Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 571-579, jul. 2010.

MANGAT, P. S.; MOLLOY, B. T. Prediction of long term chloride concentration in concrete. **Materials and Structures**, v. 27, n. 170, p. 338-346, 1994.

MARTÍN-PÉREZ, B. **Service life modeling of R.C. highway structures exposed to chlorides.** Toronto, 1999, 185 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO – Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008.

MEIJERS, S. J. H. **Computational modelling of chloride ingress in concrete.** The Netherlands, 2003, 212f. Doctoral Thesis – Delft University of Technology, 2003.

MEIRA, 2017. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamento, Diagnóstico e Prevenção.** João Pessoa: IFBP, 2017.

MEJLBRO, L. The Complete Solution of Fick's Second Law of Diffusion with Time-Dependent Diffusion Coefficient and Surface Concentration. In: SANDBERG, P. (Ed.). **Durability of Concrete in Saline Environment**, CEMENTA AB. Danderyd, Sweden, 1996. p. 127-158.

MITIDIERI FILHO, C. V. **Qualidade e Desempenho na Construção Civil.** In: Isaia, G. C. (Org.) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, 2007, cap. 2, p. 37-74.

MOREIRA, A. ; DOMINICINI, W. K. ; CALMON, J. L.; VIEIRA, D. R. Service life modelling of a bridge on a tropical marine environment for durable projects. In: 3a Conférence Internationale en Geston de Projet, 2017, Trois-Riveirs - Quebec. **Proceedings 3a Conférence Internationale en Geston de Projet**, 2017. v. 1.

NEVILLE, A. **Propriedades do Concreto**. 2ª Ed. São Paulo: Pini, 1997.

NILSSON, L. –O. **Prediction models for chloride ingress and corrosion initiation in concrete structures**. Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2001.

NORMA PORTUGUESA. **NP EN 206-1**. Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Caparica, Portugal, 2007.

PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. 2001. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

SAETTA, A. V.; SCOTTA, R. V.; VITALIANI, R. V. Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 90, n. 5, p. 441-451, oct. 1993.

SONG, H. –W.; LEE, C. –H.; ANN, K. Y. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, p. 113-121, sep. 2007.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1ª Ed. São Paulo: Pini, 2009.

TAVARES, F. **Coupled model of initiation and propagation of corrosion in reinforced concrete**. Madrid, 2013, 186 f. Tesis (Doctoral) – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2013.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 469 p., 1982.

TUUTTI, K. The effect of individual parameters on chloride induced corrosion. In NILSSON, L. –O. (Ed.). **Chloride Penetration Into Concrete Structures**. Goteborg, Sweden. 1993. p. 18-25.

UJI, K.; MATSUOKA, Y; MARUYA, T. Formulation of an equation for surface chloride content of concrete due to permeation of chloride. In: PAGE, C.; TREADAWAY, K.; BAMFORTH, P. (Eds.). **Corrosion of Reinforcement in Concrete**, Esses, England: Elsevier Applied Science, 1990. p. 258-267.

YAMAMOTO, A. et al. Proposed Durability Design for RC Marine Structures. In: SAKAI; BANTHIA; GJORV. (Eds.). **Concrete Under Severe Conditions: Environment and Loading. Proceedings.** E & FN Spon, 1995. p. 544-553

